

Інститут енергозбереження та енергоменеджменту
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра інженерної екології
(повна назва кафедри)

“ ” 2018 p.

Київ – 2018

**Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського”**

Факультет (інститут) Інститут енергозбереження та енергоменеджменту
(повна назва)

Кафедра Інженерної екології
(повна назва)

Рівень вищої освіти другий (магістерський)
перший (бакалаврський), другий (магістерський)

Спеціальність
(спеціалізація) 101 Екологія, Інженерна екологія та ресурсозбереження
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Ткачук К.К.
(підпис) (ініціали, прізвище)

«__» _____ 2018 р.

**ЗАВДАННЯ
на дипломний проект студенту**

Гайдіна Альона Василівна

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема дисертації «Машинобудівне підприємство з рекуперацією теплоти відхідних газів ливарного цеху»

науковий керівник дисертації к.т.н., ст. викл. Тверда О.Я.

(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «__» _____ 2018 р. № _____

2. Строк подання студентом дисертації 11.12.2018

3. Об'єкт дослідження: процес охолодження високотемпературних технологічних газів плавильної ділянки ливарного цеху машинобудівного підприємства.

4. Предмет дослідження технологія рекуперації відхідних газів плавильного агрегату.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: аналіз існуючих способів охолодження технологічних газів; обґрунтування доцільності застосування

рекуперації теплоти відхідних газів для сталеплавильної ділянки, шляхом розрахунку матеріального та теплового балансів дугової печі; впровадження комплексної технологічної схеми рекуперації відхідних газів плавильної ділянки ливарного цеху; розроблення стартап-проекту.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

7. Орієнтовний перелік публікацій: стаття у збірнику матеріалів І Науково-технічної конференції магістрантів ІЕЕ.

6. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Нормоконтроль	Репін Микола Володимирович		

7. Дата видачі завдання

03.09.2018

Календарний план

№	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Аналіз існуючих способів охолодження технологічних газів	3.09-25.09.2018	виконано
2.	Розрахунок матеріального та теплового балансу	26.09-08.10.2018	виконано
3	Вибір альтернативи вторинного використання ресурсів, розробка комплексної системи рекуперації відхідних газів	09.10-5.11.2018	виконано
4.	Підбір теплообмінного обладнання, проведення теплотехнічних розрахунків	6.11-12.11.2018	виконано
5.	Встановлення залежностей впливу початкових параметрів відхідних газів та витрати гарячого теплоносія на коефіцієнт теплопередачі теплообмінного агрегату	13.11-23.11.2018	виконано
6.	Розроблення стартап-проекту	24.12-30.12.2018	виконано

Студент

(підпис)

Гайдіна А.В.

(прізвище, ініціали)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

Тверда О.Я.

(прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація містить 100 сторінок, 8 ілюстрацій, 39 таблиць та 61 джерело згідно з переліком посилань.

Значне валове споживання енергії машинобудівними підприємствами в поєднанні з високою енергоємністю продукції визначають актуальність енергетичних досліджень роботи промислових агрегатів та виявлення можливостей вторинного використання їх енергоресурсів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Магістерська дисертація виконана відповідно до Енергетичної стратегії України на період до 2035 року “Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність”(Розпорядження Кабінету Міністрів від 18 серпня 2017 р. № 605-р).

Об'єкт дослідження – процес охолодження високотемпературних технологічних газів плавильної ділянки ливарного цеху машинобудівного підприємства.

Предмет дослідження – технологія рекуперації відхідних газів плавильного агрегату.

Мета роботи – виявлення можливості утилізації теплоти високотемпературних димових газів, що надходять від дугової сталеплавильної печі ливарного цеху.

Для досягнення поставленої мети визначено наступні **задачі дослідження**: аналіз існуючих способів охолодження технологічних газів, обґрунтування доцільності застосування рекуперації теплоти відхідних газів для сталеплавильної ділянки, шляхом розрахунку матеріального та теплового балансів дугової печі, впровадження комплексної технологічної схеми рекуперації відхідних газів плавильної ділянки ливарного цеху, розроблення стартап-проекту.

Методи дослідження: загальнонаукові методи аналізу і синтезу – при вивченні літературних даних, статистичні та аналітичні методи – при проведенні матеріального та теплового розрахунку дугової печі, методи математичної оптимізації для вибору типу рекуперативного обладнання, методи обробки інформації за допомогою програмного забезпечення – при розрахунку теплотехнічних параметрів рекуперативного обладнання .

Наукова новизна одержаних результатів: вперше встановлено залежність коефіцієнта теплопередачі пластинчастого рекуператора від навантаження технологічного агрегату за допомогою інтерполяційного полінома Лагранжа 4-го степеня, залежність річних витрат при експлуатації теплообмінного обладнання від навантаження технологічного агрегату, залежність коефіцієнта теплопередачі пластинчастого рекуператора від витрати гарячого теплоносія за допомогою методу найменших квадратів.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому що впровадження технологічного рішення рекуперації теплоти високотемпературних газів плавильної ділянки ливарного цеху для використання теплоти газів в якості вторинних енергоресурсів дозволить зменшити витрати на теплоносії та знизити безпосередньо температуру викидів для попередження теплового забруднення атмосфери.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідалися на I Науково-технічній конференції магістрантів ІЕЕ (за результатами дисертаційних досліджень магістрантів).

Публікації. За результатами виконаних досліджень опубліковано статтю у збірнику матеріалів I Науково-технічної конференції магістрантів ІЕЕ.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ТЕПЛООБМІННІ АПАРАТИ, ВТРАТИ ТЕПЛОТИ, ТЕХНОЛОГІЧНІ ГАЗИ, ДУГОВА СТАЛЕПЛАВИЛЬНА ПІЧ, КОЕФІЦІЄНТ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ, ЕФЕКТИВНІСТЬ РЕКУПЕРАЦІЇ.

ABSTRACT

The master thesis contains 100 pages, 8 illustrations, 39 tables and 61 sources for a list of references.

Significant gross energy consumption by machine-building enterprises in combination with high energy intensity of products determines the relevance of energy studies of industrial units, which are the main potential sources of secondary energy resources.

Relationship of work with scientific programs, plans, themes. The Master's dissertation is executed in accordance with the Energy Strategy of Ukraine for the period up to 2035 "Safety, Energy Efficiency, Competitiveness" (Order of the Cabinet of Ministers of August 18, 2017, No. 605-p).

The object of the research is the process of cooling high-temperature process gases of the melting site of the foundry shop of the machine-building enterprise.

The subject of research is the technology of recovery of waste gases of the melting unit.

The purpose of the work is to identify the possibility of utilizing the heat of high-temperature flue gases coming from an electric arc furnace of the foundry.

To achieve this goal, the following research tasks are defined: analysis of existing methods of cooling process gases, justification of the use of heat recovery of waste gases for the steelmaking section, by calculating the material and heat balances of the arc furnace, introduction of a complex technological scheme for the recovery of waste gases from the melting section of the foundry, development of a startup project.

Research methods: general scientific methods of analysis and synthesis – when studying literature data, statistical and analytical methods – when carrying out material and thermal calculation of an arc furnace, mathematical optimization methods for selecting the type of regenerative equipment, information processing using software – when calculating the thermal parameters of regenerative equipment .

Scientific novelty of the research: for the first time the dependence of the heat transfer coefficient of the plate heat exchanger on the load of the technological unit is established using the 4th degree Lagrange interpolation polynomial, the dependence of the annual costs of operating the heat exchange equipment on the load of the technological unit, the heat transfer coefficient of the plate heat exchanger from the hot coolant flow using the least heat method squares.

The practical significance of the results is that the introduction of a technological solution for heat recovery of high-temperature gases in the smelting section of the foundry to use heat of gases as secondary energy resources will reduce the cost of heat transfer media and directly reduce the temperature of emissions to prevent thermal pollution of the atmosphere

Approbation of the results of the thesis. The main results of the work were reported at the I Scientific and Technical Conference of IEE undergraduates (based on the results of dissertation research of undergraduates).

Publications. According to the results of the research, an article was published in a collection of materials of a scientific and technical conference.

KEYWORDS: HEAT EXCHANGE DEVICES, LOSSES OF HEAT, TECHNOLOGICAL GASES, ARC STEEL MELT, FACTORY TRANSFER, RECOVERY EFFICIENCY.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	10
ВСТУП	11
1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СПОСОБІВ ОХОЛОДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ГАЗІВ.....	13
1.1 Характеристика обладнання для рекуперації відхідних газів типу теплообмінних пристроїв	16
1.2 Характеристика обладнання для рекуперації відхідних газів типу утилізаційних водонагрівачів	19
1.3 Огляд описів до патентів, що відносяться до систем рекуперації високотемпературних газів металургійних виробництв	20
1.4 Аналіз закордонного та вітчизняного досвіду використання відхідних газів плавильних агрегатів	23
2 ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ РЕКУПЕРАЦІЇ ТЕПЛОТИ ВІДХІДНИХ ГАЗІВ ДЛЯ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЇ ДІЛЯНКИ.....	26
2.1 Розрахунок матеріального балансу	26
2.2 Розрахунок теплового балансу	46
2.3 Пошук шляхів вирішення поставленої проблеми.....	55
3 ВПРОВАДЖЕННЯ КОМПЛЕКСНОЇ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ РЕКУПЕРАЦІЇ ВІДХІДНИХ ГАЗІВ ЛИВАРНОГО ЦЕХУ	58
3.1 Характеристика комплексної схеми утилізації високотемпературних газів дугової сталеплавильної печі	58
3.2 Вибір типу теплотехнічного обладнання для рекуперації теплоти	61
3.3 Теплотехнічні розрахунки рекуперативного обладнання.....	64
3.3.1 Розрахунок утилізаційного контуру.....	65
3.3.2 Розрахунок контуру споживача та водогрійного котла	74
3.4 Дослідження впливу початкових параметрів відхідних газів на коефіцієнт теплопередачі теплообмінного агрегату	76

4 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ	83
4.1 Опис ідеї проекту (товару, послуги, технології).....	83
4.2 Технологічний аудит ідеї проекту.....	85
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	85
4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту	89
4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	91
ВИСНОВКИ.....	93
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	95

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ДСП – дугова сталеплавильна піч;

ТА – теплообмінний апарат;

ТП – теплообмінний пристрій;

КСВ – котел стальний водогрійний;

КУ – котел-утилізатор.

ВСТУП

Ливарне виробництво машинобудівного підприємства є значним споживачем енергоресурсів, необхідних для здійснення технологічних процесів, пов'язаних з високотемпературною дією на матеріали і супутніми процесами тепломасообміну.

Найбільш енергоємним процесом в ливарному виробництві вважається – плавлення металу, який супроводжується виділенням в атмосферу теплової енергії у вигляді високотемпературних димових газів. Втрати теплоти, окрім того що знижують ефективність роботи технологічного агрегату, провокують теплове забруднення атмосферного повітря.

Тому скорочення питомих енерговитрат та використання потенційних запасів вторинних енергоресурсів, шляхом утилізації теплоти відхідних газів плавильних агрегатів стає все більш актуальним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Магістерська дисертація виконана відповідно до Енергетичної стратегії України на період до 2035 року “Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність”(Розпорядження Кабінету Міністрів від 18 серпня 2017 р. № 605-р).

Об'єкт дослідження – процес охолодження високотемпературних технологічних газів плавильної ділянки ливарного цеху машинобудівного підприємства.

Предмет дослідження – технологія рекуперації відхідних газів плавильного агрегату.

Мета роботи – виявлення можливості утилізації теплоти високотемпературних димових газів, що надходять від дугової сталеплавильної печі ливарного цеху.

Для досягнення поставленої мети визначено наступні **задачі дослідження**: аналіз існуючих способів охолодження технологічних газів, обґрунтування доцільності застосування рекуперації теплоти відхідних газів

для сталеплавильної ділянки, шляхом розрахунку матеріального та теплового балансів дугової печі, впровадження комплексної технологічної схеми рекуперації відхідних газів плавильної ділянки ливарного цеху, розроблення стартап-проекту.

Методи дослідження: загальнонаукові методи аналізу і синтезу – при вивченні літературних даних, статистичні та аналітичні методи – при проведенні матеріального та теплового розрахунку дугової печі, методи математичної оптимізації для вибору типу рекуперативного обладнання, методи обробки інформації за допомогою програмного забезпечення – при розрахунку теплотехнічних параметрів рекуперативного обладнання .

Наукова новизна одержаних результатів: вперше встановлено залежність коефіцієнта теплопередачі пластинчастого рекуператора від навантаження технологічного агрегату за допомогою інтерполяційного полінома Лагранжа 4-го степеня, залежність річних витрат при експлуатації теплообмінного обладнання від навантаження технологічного агрегату, залежність коефіцієнта теплопередачі пластинчастого рекуператора від витрати гарячого теплоносія за допомогою методу найменших квадратів.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому що впровадження технологічного рішення рекуперації теплоти високотемпературних газів плавильної ділянки ливарного цеху для використання теплоти газів в якості вторинних енергоресурсів дозволить зменшити витрати на теплоносії та знизити безпосередньо температуру викидів для попередження теплового забруднення атмосфери.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідалися на I Науково-технічній конференції магістрантів ІЕЕ (за результатами дисертаційних досліджень магістрантів).

Публікації. За результатами виконаних досліджень опубліковано статтю у збірнику матеріалів I Науково-технічної конференції магістрантів ІЕЕ.

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СПОСОБІВ ОХОЛОДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ГАЗІВ

Метою даного розділу є аналіз можливих способів охолодження технологічних газів, огляд описів до патентів на корисну модель, вивчення вітчизняного та закордонного досвіду утилізації високотемпературних газів.

У даний час пропонуються різні підходи до вирішення проблеми охолодження технологічних газів [1]:

- розведення повітрям в газаходах за допомогою регульованих заслінок;
- розпилення води в газовому потоці перед входом в газоочисні споруди;
- використання стрижневих охолоджувачів.

Однак, висока енергоємність процесу плавлення сталі при постійному зростанні цін на паливно-енергетичні ресурси ставить на одне з перших місць проблеми енергозбереження та пошуки шляхів зменшення матеріальних та теплових витрат виробництва.

Тому, найбільш раціональним способом охолодження технологічних газів, перед викидом їх в атмосферу, вважається вторинне використання енергоресурсів – рекуперація відхідних газів з подальшим використанням тепла.

Вторинними енергоресурсами зазвичай називають енергетичні потенціали вихідної продукції, супутніх відходів, а також побічних і проміжних продуктів, які утворюються в результаті роботи технологічного агрегату, які не можуть бути використані в повному обсязі самим агрегатом, але можуть бути направлені на підвищення енергозбереження інших агрегатів чи технологічних процесів [2] .

Основними показниками якості вторинних енергоресурсів є: температурний потенціал енергоресурсів та можливий досяжний коефіцієнт тепловіддачі, робочий тиск, наявність домішок забруднюючих речовин, що здатні унеможливити подальше ефективне використання вторинних енергоресурсів.

В процесі планування використання вторинних енергоресурсів необхідно вивчити і проаналізувати технологію виробництва, роботу агрегатів, визначити основні технологічні процеси, які є потенційними джерелами надходження вторинних енергоресурсів, скласти матеріальні та теплові баланси агрегатів, визначити основні статті втрат теплоти та, виходячи з отриманих даних, визначити найбільш доцільний спосіб використання вторинних енергоресурсів, обґрунтований економічною ефективністю.

Для плавильних ділянок ливарних виробництв використання теплоти вторинних енергоресурсів можливе за трьома напрямками [3]:

- замкнені схеми – визначаються тим, що тепло вторинних енергоресурсів використовується для внутрішніх процесів, які здійснюються в основних технологічних установках (підігрів компонентів горіння, попередній підігрів матеріалів шихти);

- розімкнені схеми – характеризуються використанням вторинних енергоресурсів для зовнішніх цілей, що не пов'язані процесами, які проходять в основних технологічних установках (вироблення пари в парогенераторах, підігрів води, опалення приміщень);

- комбіновані схеми – характеризуються використанням вторинних енергоресурсів як для зовнішніх, так і для внутрішніх цілей.

Перевагою утилізації відхідних газів є економія енергії та сировини і, як наслідок, економія коштів на експлуатацію технологічного обладнання та проведення технологічного процесу.

Вибір методу утилізації визначається фізико-хімічними властивостями рекуперованих компонентів, якісним і кількісним складом сировинних і технологічних матеріалів, характером технологічних операцій та економічною складовою використання вторинних енергоресурсів.

З відхідними високотемпературними газами, що надходять із робочого простору плавильних печей втрачається значна частка теплоти. Зі зростанням теплових втрат коефіцієнт ефективності технологічного обладнання знижується.

Основними способами утилізації теплоти відхідних газів є [4]:

- нагрівання повітря, яке використовується для спалювання технологічного палива чи для опалення території цеху в теплообмінних пристроях (рекуператорах або регенераторах);

- нагрівання води в котлах-утилізаторах та економайзерах, через які проходять продукти згоряння.

Утилізація теплоти відхідних димових газів за рахунок зниження їх температури може бути виконана в двох напрямках: з поверненням утилізованої теплоти назад в піч і без повернення цієї теплоти в піч. Повернення частини теплоти димових газів в піч може здійснюватися шляхом попереднього підігріву за рахунок частини теплоти димових газів, металу, палива або повітря перед їх подачею в піч, що дозволяє підвищити коефіцієнт використання теплоти пічного агрегату, температуру і якість горіння палива, а також знизити витрату палива і супутні негативні екологічні впливи.

Для попереднього підігріву палива або повітря газами використовують рекуперативні і регенеративні теплообмінники. [5].

При другому способі утилізації частину теплоти відхідних димових газів можна використовувати в котлах-утилізаторах для отримання гарячої води або водяної пари, а також механічної або електричної енергії за допомогою теплосилових установок, завдяки чому досягається значна економія палива.

У випадках, коли температура димових газів після теплообмінних пристроїв регенеративного або рекуперативного типу залишається досить високою і доцільна подальша утилізація тепла в теплосилових установках, можуть бути використані обидва способи одночасно.

Таким чином, утилізація теплоти відхідних димових газів дозволяє досягти економії палива, причому економія палива залежить від ступеня утилізації теплоти відхідних газів, вираженої як відношення ентальпії підігрітого повітря до ентальпії відхідних з робочого простору газів.

1.1 Характеристика обладнання для рекуперації відхідних газів типу теплообмінних пристроїв

Ефективним способом використання теплоти відхідних газів є установлення на шляху викиду теплообмінних апаратів для підігрівання газу чи повітря. Теплообмінні пристрої, що використовують для підігрівання повітря чи газоподібного палива теплоту високотемпературних димових газів, за принципом теплообмінних процесів розділяють на рекуператори і регенератори [6].

Рекуператор – теплообмінний апарат, що слугує для передачі теплоти від одного газу до іншого через металеву чи керамічну стінку при стаціонарному, безупинному тепловому режимі.

Основними вимогами, які висуваються до рекуперативних пристроїв є: забезпечення максимального ступеня утилізації теплоти високотемпературних димових газів, компактність конструкції, інтенсивність теплопередачі, низький гідравлічний опір, достатня герметичність.

Основними недоліками теплообмінних апаратів рекуперативного типу є: низька вогнестійкість металічних теплообмінників та низька газоцільність керамічних рекуператорів, а також втрати теплоти через нещільності між двома сторонами теплоносіїв.

Матеріали з яких виготовляються металеві рекуператори: сірий чавун, вуглецева сталь, жароміцний чавун та сталь, які стійкі до значних діапазонів температур. Металеві рекуператори компактніші за керамічні та мають кращу герметичність, граничною температурою є 1000°C .

Матеріали, з яких виготовляються керамічні рекуператори: шамот або карборунду. Граничними температурами для ефективного застосування керамічних рекуператорів є 1300°C – 1400°C [7].

На вибір матеріалу рекуператору, окрім температури, впливають й інші фактори, що пов'язані з особливостями конструкції та експлуатації : компактність, газоцільність. У металевих рекуператорів є вищим коефіцієнт

теплопередачі у порівнянні з керамічними, завдяки малому тепловому опору стінок, що дозволяє передавати ту саму кількість теплоти повітря з меншою нагрівальною поверхнею, тому установки металевих рекуператорів є більш компактними.

Рекуперативні теплообмінники з керамічною стінкою мають більші габарити, характеризуються низькою газощільністю, що призводить значних втрат повітря, що надходить в рекуператори.

У зв'язку з вище зазначеними особливостями експлуатації керамічних теплообмінників широкого застосування вони не знайшли, лише у випадках необхідності згідно технологічних регламентів високотемпературного нагрівання повітря.

Основними типами рекуперативних апаратів є: кожухотрубні теплообмінники, теплообмінники типу «труба в трубі», спіральні (змійовикові) теплообмінники, пластинчасті теплообмінники.

При експлуатації рекуперативних кожухотрубних теплообмінних апаратів можливе використання будь-яких комбінацій теплоносіїв: рідина-рідина, газ-рідина, газ-газ. Загальним для всіх кожухотрубних теплообмінних апаратів є наявність значного числа труб (трубного пучка) і загального кожуха (корпуса), що охоплює трубний пучок.

Перевагами кожухотрубного теплообмінника є резистентність до гідроударів в системі, можливість роботи з забрудненими середовищами, зносостійкість.

Недоліками даного типу теплообмінних апаратів є відносно низький коефіцієнт теплопередачі і, як наслідок, великі габарити і площа, а також висока ціна через зростання показника металоємності.

В основі теплообмінників типу «труба в трубі» є дві співвісно розташовані труби, в кільцевому проміжку яких рухаються теплоносії. Необхідні швидкості руху теплоносіїв забезпечуються вибором відповідних діаметрів внутрішньої і зовнішньої труб.

Перевагою таких теплообмінників є простота виготовлення, можливість роботи при високих перепадах тисків теплоносіїв, високі коефіцієнти тепловіддачі.

Недоліки – висока металоємність, низька компактність, складність механічного очищення кільцевого зазору між трубами [8].

Спіральні (змійовикові) теплообмінники складаються з плоских або кручених змійовиків, занурених в ємність з рідиною, що нагрівається. Такі теплообмінники широко застосовуються в різних галузях промисловості, в тому числі в схемах утилізації вторинних енергоресурсів. Нагрівання може здійснюватися за рахунок конденсації пари в трубах, або гарячою водою.

Основна перевага таких теплообмінників є: простота конструкції, недоліки – низька інтенсивність теплообміну, для підвищення якої вдаються до установки різних змішувальних пристроїв в ємності з рідиною, що нагрівається.

У пластинчастих теплообмінниках поверхня теплообміну утворюється пакетом пластин, кожна з яких, по периметру забезпечена ущільнювачами. Теплоносії рухаються в проміжках, утворених сусідніми пластинами. З метою інтенсифікації теплообміну і збільшення площі поверхні, пластини виконуються гофрованими. Комбінація теплоносіїв може бути різноманітною: рідина-рідина, газ-рідина, газ-газ. Недоліком є недостатня герметичність і обмежений перепад тисків між теплоносіями.

В основі роботи регенераторних теплообмінників є передавання за допомогою регенеративної насадки, яка складається з вогнетривкої цегли, у вигляді решітки, теплоти від гарячих відхідних газів до повітря чи газу, що нагрівається [9].

Тепловий режим регенераторів – періодичний, нестационарний, що є головною відмінністю від рекуперативного обладнання.

Регенераторні теплообмінники працюють за наступним принципом: високотемпературні гази надходять до холодного регенератору, проходячи через нього, поступово нагрівають вогнетривку решітку, після цього подача гарячого повітря до регенераторної установки тимчасово призупиняється і

через розпечену решітку подається холодне повітря. Температура повітря, що виходить з регенератора в початковий період є достатньо високою, а потім в міру охолодження вогнетривкої решітки поступово знижується.

Значним недоліком регенеративного методу є неможливість підтримання постійної температури підігріву повітря, велика габаритність устаткування.

Таким чином, одним з основних критеріїв вибору теплоутилізаційного обладнання для вторинних енергоресурсів є його передбачувана ефективність, а також характер впливу режимних параметрів на основний робочий процес.

1.2 Характеристика обладнання для рекуперації відхідних газів типу утилізаційних водонагрівачів

Котли-утилізатори (КУ) призначені для отримання пари за рахунок використання теплоти відхідних газів технологічних агрегатів.

Якщо технологічні установки не споживають в достатній кількості паливо і тепло, яке в них виділяється, то рекуперативне обладнання за ними встановлювати не доцільно. У таких випадках широкого поширення набули саме котли утилізатори, так як існує можливість використання теплоти технологічних газів для генерації пари, спрямованої на виготовлення електроенергії в парових турбінах.

Окрім використання тепла, котли утилізатори здатні охолоджувати димові гази з подальшим вилученням з них цінних елементів. Температура газів в котлах утилізаторах охолоджується до 250 °C [10].

За стійкістю до температур установки поділяють на низькотемпературні – призначені для використання теплоти газів та високотемпературні – додатково виконують технологічні операції.

Для низькотемпературних котлів встановлюються поверхні нагрівання конвективного типу, які складаються з труб невеликого діаметру, що постійно омиваються димовими газами.

Область застосування високотемпературних котлів є чорна та кольорова металургія де їх використовують за плавильними агрегатами і рафінувальними печами.

Таким чином, котли утилізатори забезпечують економію палива за рахунок генерування енергетичного чи технологічного пару, а також нагрівання мережевої води для теплопостачання і гарячого водопостачання.

1.3 Огляд описів до патентів, що відносяться до систем рекуперації високотемпературних газів металургійних виробництв

В описі до патенту на корисну модель UA № 49015 «Теплообмінник для утилізації гарячих відхідних газів» розглянуто апарат для рекуперації технологічних агрегатів для підігріву води до 100 °C із подальшим використанням в циркуляційній схемі для опалювальних потреб чи технологічних процесів.

Запатентований пристрій оснащений трубною решіткою, яка виготовлена із сталевих труб у вигляді змійовика, з можливістю надходження у міжтрубний простір газу з температурою не нижчою 200 °C, а всередину труби – води, що нагрівається до 100 °C [11].

Впровадження обладнання дозволить досягти високого економічного ефекту теплообміну, за умови незмінних габаритів, та низької трудоемності.

В описі до патенту на корисну модель UA № 4996 «Пристрій для утилізації тепла відхідних газів» наведено способи удосконалення пристрою рекуперації теплоти пічних газів, шляхом розміщення теплообмінників в основному газоході і зовні відвідного газоходу, при певному співвідношенні площ перетинів основного і відвідного газоходів, цим самим забезпечується отримання оптимальних параметрів теплоносія і створюється можливість використання отриманого теплоносія для потреб технологічного та побутового теплопостачання заводу.

Впровадження запатентованого пристрою дозволить отримати теплоносії оптимальних параметрів для системи теплопостачання і забезпечити при цьому необхідні параметри загального потоку газів [12].

В описі до патенту на корисну модель UA № 1027 «Пристрій для охолодження газівідводу конвертора» розглянуто установку для охолодження технологічних газів, яка обладнана на зворотному водоводі гідротурбіною, для виробництва електроенергії.

Газохід конвертора охолоджується за допомогою циркуляційної води, яка забирає теплоту з відхідних високотемпературних газів, далі утилізація теплоти з підігрітої води відбувається в теплообміннику, який направляє отриману теплоту на гідротурбіну, в газотурбіні знижується тиск води, а в електрогенераторі в свою чергу починається вироблення електроенергії.

Завдяки впровадженню установки можливе не тільки охолодження газів, а й одночасне виробництво електроенергії [13].

В описі до патенту на корисну модель RU № 2470243 «Способ и устройство для использования транспортируемого прерывистым потоком отходящих газов тепла» розглянуто установку для галузі металургії, яка може бути використана для перетворення транспортованої перервним потоком відхідних газів теплоти, що надходить від промислових установок в корисну енергію.

Висока температура димових газів технологічних агрегатів знижується в газівідвідному тракті за допомогою циркуляції охолоджуючої води – подачі додаткової води в масовий потік відхідних газів, перед відводом газів через фільтр в навколишнє середовище.

Зниження температури газів необхідне для включеної нижче по потоку установки очищення газів, оскільки лише при певному температурному діапазоні досягається ефективне очищення. При цьому недоліком є те, що для роботи охолоджуючого контуру витрачається електрична енергія, а сам потік газів може бути нерівномірним.

Тому, в роботі запропоновано значення для об'ємного потоку і температури відхідних газів визначати вимірювальними засобами, а перервним потік газів, перетворювати в безперервний робочий потік з регульованими постійними цільовими значеннями об'ємної витрати і температури. При цьому транспортоване в безперервному робочому потоці тепло перетворюється в механічну, електричну або теплову корисну енергію [14].

В описі до патенту на корисну модель RU № 2552803 «Интегрированная система охлаждения газа для электрической дуговой печи» розглянуто газоохолоджувач утилізації теплоти, що надходить від дугової сталеплавильної печі для металургійної обробки – виробництва сталі.

Пристрій включає газовипускную та газовпускную камеру та ряд газоохолоджуючих труб. Газоохолоджуючі труби формують матрицю із взаємно паралельних труб, рівномірно розміщених на відстані один від одного, які утворюють газотрубний теплообмінник.

Через теплообмінник створюють циркуляцію холодоагенту по зовнішній стороні газоохолоджуючих труб для зменшення температури димових газів, шляхом переносу теплоти відхідних газів в холодоагент, в ролі якого виступає вода [15].

В описі до патенту на корисну модель UA № 21971 «Установка для утилизации тепла газов, що відходять з печі» розглянуто установку для охолодження газів, що надходять з дугової сталеплавильної печі, в якій на газовідвідному тракті, за камерою згоряння, додатково змонтовано теплоутилізатор, що з'єднаний з теплоакумуючою ємністю, через заповнений рідким теплоносієм замкнутий контур.

Запропоноване технологічне рішення здатне забезпечити стабільність теплових параметрів, різноманітність фізичних якостей теплоносія, зниження теплоти відхідних газів та спрощення конструкції.

Впровадження розробленої установки для дугової печі ємністю 100 т, забезпечить утилізацію до 500 Гкал теплоти за добу, що співставно економії при спалюванні 60 тис.м³ природного газу [16].

В описі до патенту на корисну модель UA № 90716 «Спосіб використання тепла відхідних газів нагрівальних, плавильних, випалювальних та інших установок» розглянуто спосіб, під час якого надлишкова теплота використовується для перетворення води в пару під високим тиском, в свою чергу утворений пар здатний обертати турбіну, яка провокує роботу електричного генератора з подальшим отриманням струму чи виконанням корисної роботи.

В каналах для проходження високотемпературних газів, змонтовано нагрівальний колектор, що забирає надлишкове тепло відхідних газів, та передає термодинамічному двигуну, що працює за циклом Стірлінга, завдяки чому тепло відхідних газів приводить в дію робочі органи машин та агрегатів чи провокує крутний момент вхідних валів електричних генераторів, насосів, компресорів [17].

Із застосуванням установки можливе використання теплової енергії відхідних газів для цілей перекачувань чи нагнітань рідин та газів, отримання електричної енергії, завдяки чому зменшується металоємність технологічних процесів, відповідно й кількість необхідної електричної енергії

Таким, чином огляд описів до патентів на корисну модель, свідчить про необхідність удосконалення систем рекуперації, так як пропоновані технології не забезпечують ефективної утилізації високотемпературних газів та не здатні попередити температурні перепади теплоносія.

1.4 Аналіз закордонного та вітчизняного досвіду використання відхідних газів плавильних агрегатів

На території України системи утилізації від плавильних агрегатів вперше були впроваджені на доменній печі № 2 металургійного комбінату «Запоріжсталь», а потім на доменних печах № 3 та № 5 Єнакіївського металургійного заводу. Вони базувались на рекуперативних теплообмінниках

для нагріву доменного газу та повітря за рахунок утилізації теплоти відхідних газів повітронагрівачів.

На підприємствах Хірохата (Японія) введено теплообмінні пристрої з гофрованих сталевих листів. З впровадженням таких установок коефіцієнт використання теплоти повітронагрівачів збільшився з 75 % до 79,3 %, що дозволило використовувати газову суміш з меншою теплотою згоряння.

На заводі фірми «Kobe Steel» («Kabushiki-gaisha Kōbe Seikō-sho») в Кокагаве (Японія) за повітронагрівачами доменної печі № 3 були встановлені рекуператори для підігріву газового палива. Димові гази повітронагрівачів розділяються на два потоки, проходять повітряний і газовий рекуператори і відводяться в димову трубу. Підігріте повітря подається вентилятором у виносну камеру згоряння.

На заводі фірми «Hoesch AG» в Дортмунді за доменною піччю № 7 були встановлені теплообмінники для підігріву повітря і газу горіння за рахунок тепла відхідних газів. Використовується система «GEA- ECOFLOW» з маслом в ролі проміжного теплоносія. Застосовано спеціальну техніку для розподілу енергії по повітронагрівачам, що нагріваються. Охолоджувач відхідних газів виконаний зі сталевих оребрених труб, теплообмінний апарат для повітря – зі сталевих оребрених труб в оцинкованому виконанні. Утилізатор для доменного газу – зі сталевих оребрених труб у зварному виконанні з розташуванням ребер, таким чином, щоб полегшити очистку поверхні теплообміну.

У Німеччині теплообмінники встановлені на заводі «Gutehoffnungshütte-Sterkrade» в Оберхаузені-Штеркграді, де газ і повітря підігрівують до 190 °C.

Фірма «Hoesch Stahl» також використала установку з утилізації тепла димових газів для доменної печі № 7, що включає систему теплообмінників з маслом в ролі проміжного теплоносія. У димоході перед димарем встановлено один теплообмінник для відбору тепла від відхідних газів. Перед кожним з 3-х повітронагрівачів доменної печі встановлено по два теплообмінники для підігріву суміші газів, що йдуть на опалення повітронагрівачів.

На заводі фірми «Koninklijke Nederlandsche Hoogovens en Staalfabrieken» (Нідерланди) для підігріву повітря горіння використовувалися теплообмінники з нерухомою поверхнею нагріву і обертовим ротором для холодного повітря.

Фахівцями фірми «Fuchs Systemtechnik» було розроблено проект екологічно безпечної дугового шахтної печі, в якій для попереднього підігрівання лому застосовують теплоту відхідних газів та кисневі пальники. Завдяки чому температура підігрівання шихтових матеріалів здатна досягати 900 °С. Під час проходження відхідних газів через шахту відбувається часткове видалення забруднюючих речовин у викидах, що позитивно впливає на кінцеву ефективність очистки [18].

Таким чином, вторинне використання енергоресурсів – рекуперація відхідних газів знайшла практичне застосування на технологічних установках металургійних виробництв.

Висновки до розділу 1

1. Розглянуто основні підходи до вирішення проблеми охолодження технологічних газів, визначено, що найбільш раціональним способом охолодження технологічних газів, перед викидом їх в атмосферу є вторинне використання енергоресурсів – рекуперація відхідних газів з подальшим використанням тепла.

2. Проаналізовано вітчизняний та закордонний досвід утилізації високотемпературних технологічних газів та описів до патентів на корисну модель, згідно до чого існує необхідність удосконалення систем рекуперації, так як пропоновані технології не забезпечують ефективної утилізації високотемпературних газів та не здатні попередити температурні перепади теплоносія.

2 ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ РЕКУПЕРАЦІЇ ТЕПЛОТИ ВІДХІДНИХ ГАЗІВ ДЛЯ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЇ ДІЛЯНКИ

У першому розділі розглянуто основні способи охолодження технологічних газів, визначено переваги та недоліки кожного з них, проаналізовано вітчизняний та закордонний досвід утилізації високотемпературних газів.

Метою даного розділу є: обґрунтування доцільності застосування теплоти відхідних газів, шляхом оцінювання енергетичного режиму дугової електропечі, вибір способу вторинного використання енергоресурсів.

Визначення теплової ефективності дугової печі та кількісне відображення теплових потоків процесу плавлення сталі, здійснюється на основі аналізу теплового балансу. Складанню теплового балансу передують розрахунок матеріальних витрат, точність визначення яких впливає на кінцевий результат.

2.1 Розрахунок матеріального балансу

Вихідними даними для розрахунку матеріального балансу є маса матеріалів, що надходить до плавильного агрегату та їх склад. Розраховано матеріальний баланс для дугової сталеплавильної печі ДСП-50 на 50000 кг шихти під час процесу плавлення сталі марки 08, з хімічним складом наведеним в [19].

Масовий вміст компонентів в шихті наведений в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Вміст компонентів в шихті

Компоненти шихти	Маса, кг	Елемент								
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Fe
Металевий лом	35000	140	105	105	17,5	17,5	70	35	35	34475
Чавун	10000	440	75	35	6	2			10	9432
Метал від попередньої плавки	5000	2,5	0,45	8,75	0,3	1,1	3	4,4	7,2	4972,3
Всього, кг	50000	582,5	180,45	148,75	23,8	20,6	73	39,4	52,2	48879,3
Всього, %	100	1,165	0,36	0,298	0,048	0,04	0,15	0,08	0,104	97,759

Згідно технологічних інструкцій виплавки сталей в електричних печах, процес складається з двох стадій: плавлення шихтових матеріалів та період окиснення – вирівнювання температури розплаву, видалення газів і неметалічних включень зі сплавів.

Виплавка сталі сталеплавильних печах в період плавлення пов'язана з окисними процесами – при впливі кисню проходить окиснення домішок рідкого металу: вуглецю, кремнію, марганцю, фосфору .

Розрахунок продуктів окиснення, що надходять в шлак відбувається на основі даних по угару елементів [20] та за вихідним вмістом шихтових матеріалів (табл. 2.1).

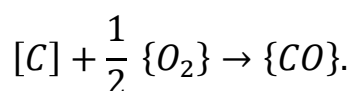
Окиснення елементів і очікуваний хімічний склад металу при розплавленні шихти наведені в табл. 2.2 [21].

Таблиця 2. 2 – Хімічний склад металу під час розплавлення шихти

Угар	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Fe	Сума
Вихідний вміст, кг	582,5	180,45	148,75	23,8	20,6	73,0	39,4	52,2	48879,3	582,5
Угар елемента, кг	116,5	81,20	29,75	11,9	0,0	14,6	0,591	0,0	3323,792	116,5
Угар	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Fe	Сума
Маса елемента в розплаві, кг	466,0	99,25	119,0	11,9	20,6	58,4	38,81	52,2	45555,51	466,0
Вміст елемента в розплаві, %	1,004	0,21	0,2	0,03	0,04	0,13	0,08	0,11	98,13	100

Визначення необхідної кількості кисню для окиснення елементів шихти відбувається згідно хімічних реакцій окиснення елементів.

Окиснення вуглецю відбувається за хімічною реакцією:



Розрахунок кількості кисню $m_{O_2}(i)$, кг, який необхідний для окиснення елементів визначається за формулою [22]:

$$m_{O_2}(i) = \frac{m_i}{V_i \mu_i} \cdot V_{O_2} \cdot \mu_{O_2}, \quad (2.1)$$

де m_i – маса окисненого елемента i , кг (згідно даних в табл. 2. 4);

V_i, V_{O_2} – стехіометричні коефіцієнти елемента i та кисню, в.о.;

μ_i – молекулярна маса елемента i , в.о.;

μ_{O_2} – молекулярна маса кисню, в.о.

Розрахунок кількості утвореного оксиду кисню $m_{i_x i_y}$, кг, визначається за формулою [23]:

$$m_{i_x i_y} = \frac{m_i}{V_i \mu_i} \cdot V_{i_x i_y} \cdot \mu_{i_x i_y}, \quad (2.2)$$

де $V_{i_x i_y}$ – стехіометричні коефіцієнти оксиду, в.о.;

$\mu_{i_x i_y}$ – молекулярна маса оксиду, в.о.

Необхідна кількість кисню для окиснення вуглецю розраховується за формулою (2.1):

$$m_{O_2}(C) = \frac{m_c}{\mu_c} \cdot \frac{1}{2} \cdot \mu_{O_2} = \frac{116,5}{1 \cdot 12} \cdot \frac{1}{2} \cdot 32 = 155,333 \text{ кг.}$$

В результаті утворюється оксид вуглецю $\{CO\}$, маса якого розраховується за формулою (2.2):

$$m_{\{CO\}} = \frac{m_c}{\mu_c} \cdot \frac{1}{2} \cdot \mu_{co} = \frac{116,5}{1 \cdot 12} \cdot 1 \cdot 28 = 271,833 \text{ кг.}$$

За аналогічним хімічними формулами було розраховано необхідна кількість кисню для окиснення кремнію, мангану, фосфору, хрому та маса утворених оксидів – двоокис кремнію (SiO_2), оксид мангану (MnO), оксид (V) фосфору (P_2O_5), оксид хрому (Cr_2O_3).

При цьому 80 % загальної маси хрому переходить в шлак – 17,0704 кг, а залишок втрачається з пічними газами – 4,268 кг.

Під час процесу плавлення в зоні електричних дуг виділяється 1,5 % нікелю від загальної маси в складі шихти, який виноситься у вигляді пилу з пічними газами – 0,591 кг.

Приймаємо, що 12 % заліза від загальної маси окиснюється до (FeO), а 88 % до Fe_2O_3 (3 % (Fe_2O_3) переходить в шлак, а все інше надходить в пічну атмосферу).

Необхідна кількість кисню для окиснення заліза до (FeO) розраховується за формулою (2.1):

$$m_{O_2}(Fe_1) = \frac{398,855}{1 \cdot 56} \cdot \frac{1}{2} \cdot 32 = 113,959 \text{ кг.}$$

В результаті утворюється оксид заліза (FeO), маса якого розраховується за формулою (2.2):

$$m_{(Fe_2O_3)} = \frac{398,855}{1 \cdot 56} \cdot 1 \cdot 72 = 512,814 \text{ кг.}$$

Маса заліза, що окиснюється до Fe_2O_3 відраховується від загальної маси заліза в шихті:

$$m_{(Fe)} = 3323,792 - 398,855 = 2924,937 \text{ кг.}$$

Необхідна кількість кисню для окиснення заліза до (Fe_2O_3) розраховується за формулою (2.1):

$$m_{O_2}(Fe_2) = \frac{2924,937}{2 \cdot 56} \cdot \frac{3}{2} \cdot 32 = 1253,544 \text{ кг.}$$

В результаті утворюється оксид заліза (Fe_2O_3), маса якого розраховується за формулою (2.2):

$$m_{(Fe_2O_3)} = \frac{2924,937}{2 \cdot 56} \cdot 1 \cdot 160 = 4178,481 \text{ кг.}$$

В шлак переходить 3% від загальної маси (Fe_2O_3):

$$m_{(Fe_2O_3)} = \frac{4178,481}{100} \cdot 3 = 125,354 \text{ кг.}$$

Тоді залишок (Fe_2O_3) втрачається з газами :

$$m_{(Fe_2O_3)} = 4178,481 - 125,354 = 4053,127 \text{ кг.}$$

Сумарна витрата кисню на окиснення елементів складе:

$$M_{O_2} = \sum_{i=1}^n m_{O_2}(i) = 1648,599 \text{ кг.}$$

Вміст розчиненого в розплаві кисню розраховується за формулою Г.Н.Ойкса [24]:

$$|O| = \frac{0,0035 + 0,006 \cdot [C]}{[C]}, \quad (2.3)$$

де $|O|$, $[C]$ вміст кисню і вуглецю в металі, %.

Тоді:

$$|O| = \frac{0,0035 + 0,006 \cdot 1,004}{1,004} = 0,00949 \text{ \%}.$$

Вміст кисню в металі складає :

$$m_{|O|} = \frac{|O|}{100} \cdot m_{M_e} = \frac{0,00949}{100} \cdot 46421,66 = 4,405 \text{ кг.}$$

Таким чином вміст кисню, який необхідний для окиснення шихти в період плавлення складає :

$$m_{O_2} = M_{O_2} + m_{|O|} = 1648,599 + 4,405 = 1653,004 \text{ кг.}$$

З урахуванням розчиненого в металі кисню очікуваний масовий і відсотковий склад металу після розплавлення шихти наведений в табл. 2. 3.

Таблиця 2.3 – Склад металу після розплавлення шихти

Елемент	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Fe	O	Сума
Маса елемента в розплаві, кг	466,0	99,25	119,0	11,90	20,60	58,40	38,81	52,20	4555 5,51	4,41	46426,07
Вміст елемента в розплаві, %	1,004	0,21	0,26	0,03	0,04	0,123	0,08	0,112	98,13	0,009	100,0

Сталеплавильні процеси здійснюються при тісній взаємодії металу й шлаку. При цьому шлак є неминучим побічним продуктом будь-якого способу сучасного виробництва сталі в відкритих агрегатах. Формування шлаку певного складу, фізичних і хімічних властивостей є необхідною умовою отримання якісної сталі.

Джерела формування шлаку: продукти окиснення заліза і його домішок, продукти руйнування вогнетривкої кладки футеровки, шлакоутворюючі присадки [25].

Хімічний склад шлакоутворюючих матеріалів для завантаження до плавильного агрегату наведений в [26].

Приймаємо надходження в шлак вапна – 2,3 % від маси металу в дуговій сталеплавильній печі (50000 кг) – 1150 кг, тоді у ванні залишається 95 % шлаку попередньої плавки.

$$m_{CaO} = \frac{m_{\text{вп}}}{100} \cdot (CaO) = \frac{1150}{100} \cdot 89 = 1023,5 \text{ кг.}$$

Аналогічно розраховуємо значення для MgO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , P_2O_5 , S , CO_2 .

Витрата доломіту складає 0,6 % від маси металу – 300 кг.

$$m_{CaO} = \frac{m_{\text{дол}}}{100} \cdot (CaO) = \frac{300}{100} \cdot 53 = 159 \text{ кг,}$$

Аналогічно розраховуємо значення для MgO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , P_2O_5 .

Кількість і склад шлаку в період плавлення наведений в табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Кількісний склад шлаку в період плавлення

Компоненти	Шлак попередньої плавки	Надійшло з металу	Вапно	Доломіт	Всього, кг	Всього, %
CaO	598,322		1023,5	159	1780,822	51,025
MgO	42,700		52,785	119,19	214,675	6,151
SiO ₂	277,667	174,006	34,5	10,2	496,373	14,222
Al ₂ O ₃	21,514		26,45	0,21	48,174	1,380
FeO	72,841	512,814			585,655	16,780
Fe ₂ O ₃	25,621	125,354	8,05	5,4	164,425	4,711
P ₂ O ₅	17,090	27,255	1,38	6	51,725	1,482
MnO	47,270	75,4375			122,708	3,516
Cr ₂ O ₃		21,338			21,338	0,611
S	4,207		1,035		5,242	0,150
Всього	1107,233	936,205	1146,665	300,000	3490,103	100,000

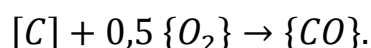
Під час завершення окиснювального періоду в металі має залишитися 0,05 % вуглецю. Тобто:

$$m_{|c|} = 46426,069 \cdot 0,0005 = 23,213 \text{ кг.}$$

Тоді, кількість вуглецю, що окиснюється під час окиснювального періоду обраховується:

$$m_{|c|} = 466 - 23,213 = 442,787 \text{ кг.}$$

Окиснення газоподібним киснем відбувається за реакцією:



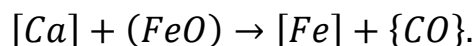
Необхідна кількість кисню для окиснення вуглецю. розраховується за формулою (2.1):

$$m_{O_2}(C) = \frac{0,7 \cdot 442,787}{1 \cdot 12} \cdot \frac{1}{2} \cdot 32 = 413,268 \text{ кг,}$$

В результаті утворюється оксид вуглецю $\{CO\}$, маса якого розраховується за формулою (2.2):

$$m_{\{CO\}} = \frac{0,7 \cdot 442,787}{1 \cdot 12} \cdot 1 \cdot 28 = 723,219 \text{ кг.}$$

Окиснення вуглецю оксидом заліза (FeO) відбувається за реакцією:



Тоді кількість оксиду заліза $m_{(FeO)}(i)$, необхідного для окиснення елемента, розраховується за формулою:

$$m_{(FeO)}(i) = \frac{0,3 \cdot m_i}{V_i \mu_i} \cdot V_{FeO} \cdot \mu_{FeO}, \quad (2.4)$$

де 0,3 – доля елемента, що окиснюється за рахунок (FeO), в.о.;

m_i, μ_i – маса елемента, кг;

μ_i, μ_{FeO} – молекулярні маси, в. о.

Кількість оксиду $m_{i_x i_y}$, що утворюється в результаті окиснення оксидом (FeO) знаходимо за формулою [27].

$$m_{i_x i_y}(i) = \frac{0,3 \cdot m_i}{V_i \mu_i} \cdot V_{i_x i_y} \cdot \mu_{i_x i_y}, \quad (2.5)$$

де $\mu_{i_x i_y}$ – молекулярна маса оксида, в.о.

Необхідна кількість (FeO) для окиснення вуглецю розраховується за формулою (2.4):

$$m_{(FeO)}(C) = \frac{0,3 \cdot 442,787}{1 \cdot 12} \cdot 1 \cdot 72 = 797,0166 \text{ кг.}$$

В результаті утворюється оксид вуглецю (CO), маса якого розраховується за формулою (2.5):

$$m_{(CO)} = \frac{0,3 \cdot 442,787}{1 \cdot 12} \cdot 1 \cdot 28 = 309,951 \text{ кг.}$$

За аналогічним алгоритмом проведені розрахунки для Mn, Si, P, Cr .

Приймаємо, що нікель і мідь в окиснювальний період із металу не видаляються.

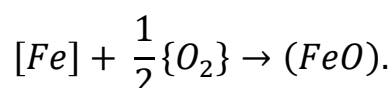
Сумарна витрата кисню на окиснення елементів складе:

$$M_{O_2} = \sum_{i=1}^n m_{O_2}(i) = 485,016 \text{ кг.}$$

Сумарна кількість оксиду заліза (FeO), необхідна для окиснення елементів складе:

$$M_{O_2} = \sum_{i=1}^n m_{FeO}(i) = 993,429 \text{ кг.}$$

Окиснення заліза відбувається за реакцією:



Необхідна кількість кисню для отримання оксиду заліза (FeO) розраховується за формулою (2. 1):

$$m_{\{O_2\}} = \frac{m_{FeO}}{\mu_{FeO}} \cdot \frac{1}{2} \cdot \mu_{O_2} = \frac{993,429}{72} \cdot \frac{1}{2} \cdot 32 = 220,762 \text{ кг.}$$

При цьому необхідно кількість заліза Fe :

$$m_{(Fe)} = \frac{m_{FeO}}{\mu_{FeO}} \cdot \mu_{Fe} = \frac{993,429}{72} \cdot 56 = 772,667 \text{ кг.}$$

Вміст кисню в металі під кінець окиснювального періоду визначається за формулою (2. 3):

$$|O| = \frac{0,0035 + 0,006 \cdot 0,05}{0,05} = 0,076 \text{ \%}.$$

В кінці періоду плавлення вміст кисню в металі був 0,0095 %, тому необхідно підвищити його вміст на 0,0665 %.

$$m_{|O|} = \frac{0,0667}{100} \cdot 46426,069 = 30,966 \text{ кг.}$$

Загальна кількість кисню необхідна в окиснювальний період:

$$m_{O_2} = 30,966 + 485,016 + 220,762 = 736,744 \text{ кг.}$$

Розрахуємо кількість утвореного шлаку під час окиснювального періоду.
Приймаємо, що окиснюваність шлаку в період окиснення складає 7%.

Тоді відсотковий вміст заліза в шлаці від (FeO) складає:

$$Fe_{(FeO)} = \frac{\mu_{Fe}}{\mu_{FeO}} \cdot 7\% = \frac{56}{72} \cdot 7 = 5,444 \%,$$

Відношення кількості заліза, що міститься в компонентах шлаку (FeO) та (Fe_2O_3) рівне 2.

Тоді відсотковий вміст заліза в шлаці від (Fe_2O_3) складає:

$$Fe_{(Fe_2O_3)} = \frac{Fe_{(FeO)}}{2} = \frac{5,444}{2} = 2,722 \, \%.$$

Отже, в шлаці окиснювального періоду міститься :

$$(Fe_2O_3) = \frac{\mu_{Fe_2O_3}}{2 \cdot \mu_{Fe}} \cdot Fe_{(Fe_2O_3)}, \quad (2.6)$$

де (Fe_2O_3) – вміст оксиду в шлаці, в.о.

За формулою (2.6) вміст осиду (Fe_2O_3) в шлаці складає:

$$(Fe_2O_3) = \frac{160}{2 \cdot 56} \cdot 2,722 = 3,889 \, \%.$$

Маса оксидів заліза розраховується за формулами [28]:

$$m_{(FeO)} = \frac{(FeO)}{100} \cdot m_{шл}, \quad (2.7)$$

$$m_{(Fe_2O_3)} = \frac{(Fe_2O_3)}{100} \cdot m_{шл}, \quad (2.8)$$

де (FeO) , (Fe_2O_3) – вміст оксидів в шлаці, в.о.

Після періоду плавлення у ванні залишається 20 % шлаку, тобто 698,021 кг. Тоді разом зі шлаком періоду плавлення надійдуть наступні речовини (згідно розрахованих даних табл. 2.4):

$$m_{(CaO)} = \frac{51,025}{100} \cdot 698,021 = 356,165 \text{ кг.}$$

Аналогічно розраховуємо значення для MgO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , P_2O_5 , S , FeO , MnO , Cr_2O_3 .

Тоді сумарне значення шлаку складе:

$$\sum m = 698,228 \text{ кг.}$$

В шлак із металу надійдуть наступні речовини (згідно розрахунків кількості заліза за формулою (2.5)):

$$\sum m_{MnO} = 34,116 + 14,621 = 48,737 \text{ кг.}$$

Аналогічно розраховуємо значення для SiO_2 , Cr_2O_3 , P_2O_5 .

Тоді сумарні значення шлаку складуть:

$$\sum m = 317,972 \text{ кг.}$$

Новий шлак наводиться присадкою вапна, приймаємо основність шлаку 3, отже маса вапна може бути розрахована за формулою :

$$m_{\text{вп}} = \frac{3 \cdot m_{(\text{SiO}_2), \text{п.шл}} - m_{(\text{CaO}), \text{п.шл}}}{\text{CaO}_{\text{вп}}/100 - 3 \cdot \text{SiO}_2_{\text{вп}}/100}, \quad (2.9)$$

де $\text{CaO}_{\text{вп}}$, $\text{SiO}_2_{\text{вп}}$ – вміст сполук у вапні, в.о.

Тоді маса вапна згідно формули (2.9):

$$m_{\text{вп}} = \frac{3 \cdot 302,995 - 356,165}{\frac{89}{100} - 3 \cdot \frac{3}{100}} = 691,025 \text{ кг.}$$

Отже, приймаємо кількість вапна 691 кг. Розрахуємо масу сполук, які надходять із вапном в шлак:

$$m_{\text{CaO}} = \frac{m_{\text{вп}}}{100} \cdot (\text{CaO}) = \frac{691}{100} \cdot 89 = 614,99 \text{ кг.}$$

Аналогічно розраховуємо значення для MgO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , P_2O_5 . S.

Тоді сумарне значення шлаку складе:

$$\sum m = 695,2152 \text{ кг.}$$

При цьому утворюється (CO_2) в кількості :

$$m_{\text{CO}_2} = \frac{691}{100} \cdot 0,2 = 1,39 \text{ кг.}$$

Загальна маса шлаку без оксидів заліза складає:

$$\sum m = 548,212 + 317,972 + 690,3782 = 1556,562 \text{ кг.}$$

Тоді сумарне значення шлаку знайдемо за формулою:

$$m_{\text{шл}} = \frac{m_{\text{шл}}''}{1 - (Fe_2O_3 + FeO)/100}, \quad (2.10)$$

де $m_{\text{шл}}''$ — маса шлаку без оксидів заліза, кг;

Fe_2O_3, FeO — вміст оксидів в шлаці, %.

Тоді маса шлаку за формулою (2.10) складатиме:

$$m_{\text{шл}} = \frac{1556,562}{1 - \frac{3,889 + 7}{100}} = 1746,768 \text{ кг.}$$

Розраховуємо масу оксидів заліза за формулами (2.7) та (2.9).

$$m_{(FeO)} = \frac{7}{100} \cdot 1746,768 = 122,274 \text{ кг.}$$

$$m_{(Fe_2O_3)} = \frac{3,889}{100} \cdot 1746,768 = 67,932 \text{ кг.}$$

Із шлаку періоду плавлення надходить: FeO — 117,131 кг та Fe_2O_3 — 32,885 кг, із вапна надходить Fe_2O_3 — 4,837 кг. Сумарно отримаємо FeO — 117,131 кг та Fe_2O_3 — 37,722 кг, тому необхідно додати FeO в кількості 4,506 кг та Fe_2O_3 — 30,21 кг.

Необхідна кількість кисню для утворення (Fe_2O_3) розрахована згідно формули (2.1):

$$m_{(O_2)} = \frac{m_{Fe_2O_3}}{\mu_{Fe_2O_3}} \cdot \frac{3}{2} \mu_{O_2} = \frac{30,21}{160} \cdot \frac{3}{2} \cdot 32 = 9,063 \text{ кг.}$$

Необхідна кількість кисню для утворення (FeO) розрахована згідно формули (2.1):

$$m_{(O_2)} = \frac{m_{FeO}}{\mu_{FeO}} \cdot \frac{1}{2} \mu_{O_2} = \frac{4,506}{72} \cdot \frac{1}{2} \cdot 32 = 1,001 \text{ кг.}$$

Необхідна кількість заліза на утворення оксиду заліза (Fe_2O_3):

$$m_{(Fe)} = \frac{m_{Fe_2O_3}}{\mu_{Fe_2O_3}} \cdot 2 \cdot \mu_{Fe} = \frac{30,21}{160} \cdot 2 \cdot 56 = 21,147 \text{ кг.}$$

Необхідна кількість заліза на утворення оксиду заліза (FeO):

$$m_{(Fe)} = \frac{m_{FeO}}{\mu_{FeO}} \cdot \mu_{Fe} = \frac{4,506}{72} \cdot 56 = 3,504 \text{ кг.}$$

Кількість і склад шлаку під час окиснювального періоду представлена в табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Кількісний склад шлаку в період окиснення

Компоненти	Шлак попередньої плавки	Надійшло з металу	Вапно	Всього, кг	Всього, %
CaO	356,165		614,99	971,155	55,617
MgO	42,935		31,717	74,652	4,275
SiO ₂	99,275	203,72	20,73	323,725	18,540
Al ₂ O ₃	9,635		15,893	25,528	1,462
FeO	117,131	4,506		121,637	6,966
Fe ₂ O ₃	32,885	30,21	4,837	67,932	3,890
P ₂ O ₅	10,345	20,874	0,8292	32,0482	1,835
MnO	24,542	48,737		73,279	4,197
Cr ₂ O ₃	4,268	44,641		48,909	2,801
S	1,048		6,219	7,267	0,416
Всього	698,229	352,688	695,2152	1746,1322	100

Визначимо склад металу під час окиснювального періоду. Кількість заліза, що витрачається на утворення оксидів заліза:

$$m_{(Fe)} = 21,147 + 3,504 = 24,651 \text{ кг.}$$

Тоді заліза в металі залишиться:

$$m_{(Fe)} = 45555,508 - 24,651 = 45530,857 \text{ кг.}$$

Кількість і склад металу в кінці окиснювального періоду наведена в табл. 2.6 [29].

Таблиця 2.6 – Масовий і відсотковий склад металу в кінці окиснювального періоду

Елемент	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Fe	O	Сума
Маса елемента в розплаві	23,21	4,18	81,25	2,79	20,6	27,86	38,81	52,2	45830,86	35,28	46117,03
Вміст елемента в розплаві, %	0,05	0,009	0,18	0,006	0,05	0,06	0,08	0,11	99,38	0,08	100

Вміст кисню в кінці окиснювального періоду згідно формули (2.3):

$$m_{|O|} = \frac{0,076}{100} \cdot 46426,069 = 35,284 \text{ кг.}$$

Визначаємо кількість і склад газів в період плавлення і окиснення. Під час плавки витрачається 1,3 кг/т електродів, в електродах вміст вуглецю складає 99%, отже окиснюється вуглецю:

$$m_c = \frac{1,3 \cdot 50}{100} \cdot 99 = 64,35 \text{ кг.}$$

Приймаємо, що 70 % вуглецю окиснюється до $\{CO\}$, а 30 % до $\{CO_2\}$.

Тоді утворюється:

$$m_{\{CO\}} = \frac{0,7 \cdot m_c}{\mu_c} \cdot \mu_{CO} = \frac{0,7 \cdot 64,35}{12} \cdot 28 = 105,105 \text{ кг},$$

$$m_{\{CO_2\}} = \frac{0,3 \cdot m_c}{\mu_c} \cdot \mu_{CO_2} = \frac{0,3 \cdot 64,359}{12} \cdot 44 = 70,795 \text{ кг}.$$

Кількість кисню необхідна для окиснення вуглецю до CO та CO_2 складе:

$$m^1_{\{O_2\}} = \frac{m_c \cdot 0,7 \cdot \mu_O}{\mu_c} = m_{CO} - m_c = 105,105 - 64,35 \cdot 0,7 = 60,06 \text{ кг},$$

$$m^2_{\{O_2\}} = \frac{m_c \cdot 0,3 \cdot \mu_O}{\mu_c} = m_{CO_2} - m_c = 70,795 - 64,35 \cdot 0,3 = 51,49 \text{ кг}.$$

Тоді маса кисню необхідна на окиснення вуглецю електродів буде рівна:

$$m_{\{O_2\}} = m^1_{\{O_2\}} + m^2_{\{O_2\}} = 60,06 + 51,49 = 111,55 \text{ кг}.$$

Сумарна кількість необхідного кисню на окиснювальні процеси під час періоду плавки та окиснення складе – 2512,362 кг. Приймаємо, що 2% від загальної маси кисню припадає на кисень в повітрі – 50,24 кг.

Сумарна кількість необхідного кисню на окиснювальні процеси під час періоду плавки та окиснення складе – 2512,362 кг. Приймаємо, що 2% від загальної маси кисню припадає на кисень в повітрі – 50,24 кг.

Тоді об'єм кисню в повітрі складе:

$$V_{O_2} = \frac{22,4}{\mu_{O_2}} \cdot m_{O_2} = \frac{22,4}{32} \cdot 50,24 = 35,168 \text{ м}^3,$$

Кількість супутнього кисню знаходимо виходячи з умови, що об'ємний вміст кисню в повітрі рівний 21%. Тоді:

$$V_N = \frac{100 - 21}{21} \cdot V_{O_2} = V_{O_2} \cdot 35,168 = 132,299 \text{ м}^3.$$

$$m_N = \frac{100 - 23}{23} \cdot m_{O_2} = \frac{100 - 23}{23} \cdot 50,24 = 168,195 \text{ кг.}$$

Об'єм і маса повітря відповідно:

$$V_{\Pi} = V_{O_2} + V_N = 35,168 + 132,299 = 167,467 \text{ м}^3.$$

$$m_{\Pi} = m_{O_2} + m_N = 50,24 + 168,195 = 218,435 \text{ кг.}$$

Кількість необхідного газоподібного кисню визначається за умови, що коефіцієнт його використання $k_{\text{вик}} = 0,85$:

$$m_{O_2} = \frac{100 - 2}{100} \cdot \frac{2512,362}{0,85} = 2896,6056 \text{ кг.}$$

Кількість кисню визначається із умови, що вміст кисню в ньому 99,9 %.

$$m_{O_{2,\text{техн}}} = \frac{2896,6056}{99,9} \cdot 100 = 2899,505 \text{ кг.}$$

$$V_{O_{2,\text{техн}}} = \frac{22,4}{\mu_{O_2}} \cdot m_{O_{2,\text{техн}}} = \frac{22,4 \cdot 2899,505}{32} = 2029,654 \text{ м}^3.$$

Кількість азоту, що вноситься з киснем складає:

$$m_N = m_{O_{2,\text{техн}}} - m_{O_2} = 2899,505 - 2896,6056 = 2,8994 \text{ кг.}$$

При нагріванні вапна виділяється CO_2 в кількості 3,69 кг .

Визначимо кількість вологи, що вноситься повітрям за наступних умов:

$$t_B = 20^\circ\text{C}, P_B = 760 \text{ мм. рт. ст.}, f = 0,7, E = 17,5 \text{ мм. рт. ст.}$$

Об'єм вологого атмосферного повітря визначається за формулою [30]:

$$V_{\text{вол.пов}} = V_{\text{п}} \cdot \frac{273+t_{\text{в}}}{273} \cdot \frac{P_{\text{в}}}{P_{\text{в}}-E \cdot f}, \quad (2.11)$$

$$V_{\text{вол.пов}} = 167,467 \cdot \frac{293}{273} \cdot \frac{760}{760 - 17,5 \cdot 0,7} = 182,680 \text{ м}^3.$$

Кількість водяної пари в 1м^3 атмосферного повітря :

$$\rho_{\text{в.пар}} = 0,29 \cdot \frac{E \cdot f}{273} = 0,29 \cdot \frac{17,5 \cdot 0,7}{273} = 0,013 \text{ кг/м}^3.$$

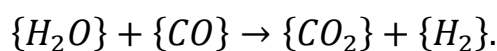
Маса вологи розраховується за формулою:

$$m_{\text{вол}} = V_{\text{вол.пов}} \cdot \rho_{\text{в.пар}} = 182,680 \cdot 0,013 = 2,375 \text{ кг.}$$

Тоді маса вологого повітря складе:

$$m_{\text{вол.пов}} = 2,375 + 218,435 = 220,81 \text{ кг.}$$

Водяна пара реагує з оксидом вуглецю за реакцією:



Маса утвореного водню: і вуглекислого газу відповідно:

$$m_{\{H_2\}} = \frac{m_{\text{вол}}}{\mu_{\{H_2O\}}} \cdot \mu_{\{H_2\}} = \frac{2,375}{18} \cdot 2 = 0,264 \text{ кг.}$$

Маса утвореного вуглецю розраховується відповідно .

$$m_{\{CO_2\}} = \frac{m_{\text{вол}}}{\mu_{\{H_2O\}}} \cdot \mu_{\{CO_2\}} = \frac{2,375}{18} \cdot 44 = 5,806 \text{ кг.}$$

Необхідна кількість оксиду вуглецю:

$$m_{\{CO\}} = \frac{m_{\text{вол}}}{\mu_{\{H_2O\}}} \cdot \mu_{\{CO\}} = \frac{2,375}{18} \cdot 28 = 3,694 \text{ кг.}$$

Приймаємо, що 15 % газоподібного кисню витраченого в період плавлення і окиснення відходить в атмосферу печі, тобто:

$$m_{O_2} = \frac{15}{100} \cdot 2896,6056 = 434,491 \text{ кг.}$$

Дана кількість кисню вступить в реакцію з CO , в результаті утвориться вуглекислий газ в кількості:

$$m_{\{CO_2\}} = \frac{m_{O_2}}{\frac{1}{2} \mu_{\{O_2\}}} \cdot \mu_{\{CO_2\}} = \frac{434,491}{\frac{1}{2} \cdot 32} \cdot 44 = 1194,850 \text{ кг.}$$

Для утворення CO_2 необхідно CO в кількості :

$$m_{\{CO\}} = 1194,850 - 434,491 = 760,359 \text{ кг.}$$

Масовий і відсотковий середній хімічний склад газів за два періоди – плавлення та окиснення представлені в табл. 2.7.

Таблиця 2.7 – Середній хімічний склад газів за два періоди

Гази	Склад газів		
	кг	м ³	%
CO	869,158	695,326	51,5952
CO_2	1275,14	649,163	48,1697
H_2	0,264	2,9568	0,2194
N_2	171,094	0,2112	0,01567
Всього	2315,66	1347,66	100

Таким чином, статті витрат та надходжень матеріального балансу мають наступний вигляд (табл. 2.8).

Таблиця 2.8 – Матеріальний баланс для дугової печі ДСП-50

Витрачено, кг		Отримано, кг	
Металевий лом	35000	Метал	45830,857
Рідкий чавун	10000	Шлак	4538,0062
Метал, попередньої плавки	5000	Гази	2315,657
Вапно	1841	Пил в тому числі:	4057,986
Доломіт	300	Fe_2O_3	4053,127
Електроди	65	Ni	0,591
Повітря	220,8	Cr_2O_3	4,268
Газоподібний кисень	2896,6056		
Шлак попередньої плавки	698,229		
Сума	56021,6346	Сума	56742,506

2.2 Розрахунок теплового балансу

Вихідними даними для проведення теплового розрахунку є попередньо отримані значення матеріальних витрат (табл. 2.11) та технологічні параметри: витрата води, що подається для охолодження елементів плавильної печі – $30 \text{ м}^3/\text{год}$, середня температура відхідних газів – $1000 \text{ }^\circ\text{C}$.

Основними складовими теплового балансу є кількість тепла, що надходить під час процесу плавлення сталі $W_{\text{надх}}$ та технологічної теплоти, яка втрачається $W_{\text{витр}}$:

$$W_{\text{надх}} \approx W_{\text{витр.}}$$

Структура теплового балансу дає змогу визначити джерела втрат тепла і розробити заходи щодо їх зменшення.

Статті надходження енергії в загальному описуються виразом [31]:

$$W_{\text{надх}} = W_{\text{ел}} + W_{\text{чав}} + W_{\text{вп}} + W_{\text{дол}} + W_{\text{екз}} + W_{\text{шл}} + W_{\text{ок.ел}} + W_{\text{пов}},$$

де $W_{\text{ел}}$ – теплота, що вноситься електричними дугами, ГДж;

$W_{\text{чав}}$ — теплота, що вноситься з рідким чавуном, ГДж;

$W_{\text{вп}}$ — теплота, що надходить з вапном, ГДж;

$W_{\text{дол}}$ — теплота, що надходить з доломітом, ГДж;

$W_{\text{екз}}$ — теплота хімічних екзотермічних реакцій окиснення, ГДж;

$W_{\text{шл}}$ — теплота шлакоутворення, ГДж;

$W_{\text{ок.ел}}$ — теплота від окиснення графітових електродів, ГДж;

$W_{\text{пов}}$ — теплота, що вноситься повітрям і газоподібним киснем, ГДж.

Теплота, що вноситься електричними дугами ($W_{\text{ел}}$) вимірюється з достатньо високою точністю лічильниками активної енергії, що встановлюються на печі. Кількість тепла визначається за формулами:

$$W_{\text{ел}}^1 = K \cdot P_{\text{ел.пл}} \cdot \frac{\tau_{\text{пл}}}{60}, \quad (2.11)$$

$$W_{\text{ел}}^2 = K \cdot P_{\text{ел.ок}} \cdot \frac{\tau_{\text{ок}}}{60}, \quad (2.12)$$

де K — коефіцієнт використання потужності ($K = 0,93$ і $K = 0,97$) відповідно в період плавлення і окиснення, в.о.;

$P_{\text{ел.пл}}$, $P_{\text{ел.ок}}$ — потужність печі в період плавлення та окиснення, МВт;

$\tau_{\text{пл}}$, $\tau_{\text{ок}}$ — час плавлення та окиснення, год.

$$W_{\text{ел}}^1 = 0,93 \cdot 27,9 \cdot \frac{28}{60} = 7,769 \text{ МВт} \cdot \text{год},$$

$$W_{\text{ел}}^2 = 0,97 \cdot 18 \cdot \frac{12}{60} = 3,492 \text{ МВт} \cdot \text{год},$$

$$W_{\text{ел}} = W_1^1 + W_1^2 = 7,769 + 3,492 = 11,261 \text{ МВт} \cdot \text{год} = 40,538 \text{ ГДж}.$$

Кількість теплоти, що вноситься з рідким чавуном ($W_{\text{чав}}$) визначається за формулою [32]:

$$W_{\text{чав}} = m_{\text{р.ч}} \cdot (C_{\text{ч}}^{\text{р}}(t_{\text{ч}} - t_{\text{пл.ч}}) + q_{\text{пл}} + C_{\text{ч}}^{\text{ТВ}} \cdot t_{\text{пл.ч}}), \quad (2.13)$$

де $m_{p,ч}$ – маса рідкого чавуну, кг;

$C_{ч}^p$ – середня питома теплоємність рідкого чавуну в інтервалі температур 1200-1300 °С, кДж/(кг· К);

$t_{ч}$ і $t_{пл,ч}$ – температура відповідно залитого чавуну і його плавлення, °С;

$q_{пл}$ – тепота плавлення, кДж/кг;

$C_{ч}^p$ – середня питома теплоємність твердого чавуну в інтервалі температур 0-1200 °С, кДж/(кг· К).

$$W_{чав} = 10000 \cdot (0,837(1300 - 1200) + 217,72 + 0,745 \cdot 1200) = 11,954 \text{ ГДж.}$$

Кількість теплоти, що надходить з вапном ($W_{вп}$) розраховується за формулою:

$$W_{вп} = m_{вп} \cdot C_{вп} \cdot t_{вп}, \quad (2.14)$$

де $C_{вп}$ – питома теплоємність вапна, 0,760 кДж/(кг· К);

$m_{вп}$ – маса внесеного вапна, кг;

$t_{вп}$ – температура сировини, що надходить, °С.

$$W_{вп} = 1841 \cdot 20 \cdot 0,76 = 0,028 \text{ ГДж.}$$

Кількість теплоти, що надходить з доломітом ($W_{дол}$) розраховується за формулою:

$$W_{дол} = m_{дол} \cdot C_{дол} \cdot t_{дол}, \quad (2.15)$$

де $C_{вп}$ – питома теплоємність доломіту, 1213 кДж/(кг· К).

$$W_{дол} = 30 \cdot 20 \cdot 1213 = 0,0073 \text{ ГДж.}$$

Визначення теплоти екзотермічних реакцій ($W_{\text{екз}}$) відбувається на основі матеріального балансу, за допомогою якого визначається склад і кількість вихідних матеріалів і продуктів плавки:

$$W_{\text{екз}} = m_{\text{ел}} \cdot \Delta H_{\text{ел}}, \quad (2.16)$$

де $m_{\text{ел}}$ – маса елемента, що окиснюється, кг;

$\Delta H_{\text{ел}}$ – тепловий ефект реакції окиснення елемента, МДж/кг.

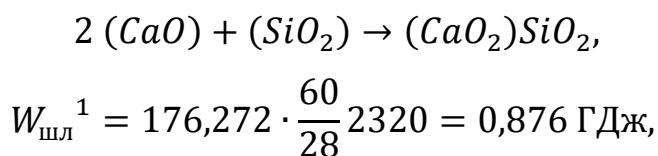


За відповідними хімічними рівняннями розраховано теплоту екзотермічних реакцій для Mn , Fe , C , P , Cr .

Тоді загальне надходження теплоти від всіх екзотермічних реакцій складає:

$$W_{\text{екз}} = 2,805 + 0,279 + 1,639 + 5,061 + 0,197 + 0,346 = 9,982 \text{ ГДж}.$$

Теплота шлакоутворення ($W_{\text{шл}}$) розраховується згідно хімічних реакцій:

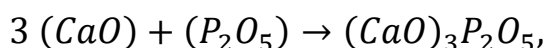


де 176,272 – кількість кремнію, що окиснюється під час плавлення, кг;

60 – молекулярна маса SiO_2 , в.о.;

28 – молекулярна маса Si , в.о.;

2320 – тепловий ефект реакції, кДж/кг.



$$W_{\text{шл}}^2 = 21,014 \cdot \frac{142}{62} 4700 = 0,226 \text{ ГДж},$$

$$W_{\text{шл}} = 1,103 \text{ ГДж}.$$

Теплота від окиснення електродів ($W_{\text{ок.ел}}$) розраховується за формулою:

$$W_{\text{ок.ел}} = 0,6 \cdot \Delta m_e \cdot q_c, \quad (2.17)$$

де Δm_e — маса витрачених електродів, кг;

q_c — тепловий ефект окиснення графіту, МДж/кг.

$$W_{\text{ок.ел}} = 0,6 \cdot 65 \cdot 33,5 = 1,307 \text{ ГДж}.$$

Теплота, що вноситься повітрям і газоподібним киснем розраховується за формулою:

$$W_{\text{пов}} = V \cdot C_v \cdot T, \quad (2.18)$$

де V — об'єм повітря чи кисню, м³;

C_v — теплоємність повітря і кисню, кДж/(м³ · К);

T — температура повітря чи кисню, К.

$$W_{\text{пов}} = 220,81 \cdot 1,327 \cdot 293 = 0,086 \text{ ГДж},$$

$$W_{\text{пов}}^{\text{кис}} = 2896,61 \cdot 1,31 \cdot 293 = 1,112 \text{ ГДж},$$

$$W_{\text{пов}} = 1,198 \text{ ГДж}.$$

Статті втрат енергії [33]:

$$W_{\text{надх}} = W_{\text{к.ен}} + W_{\text{відх.г}} + W_{\text{Fe}_2\text{O}_3} + W_{\text{енд}} + W_{\text{ох.в}} + W_{\text{ф}},$$

де $W_{\text{к.ен}}$ – фізична теплота сталі, ГДж;

$W_{\text{відх.г}}$ – втрати теплоти з відхідними газами, ГДж;

$W_{\text{Fe}_2\text{O}_3}$ – теплота, що виноситься частками Fe_2O_3 , ГДж;

$W_{\text{енд}}$ – теплота хімічних ендотермічних реакцій, ГДж;

$W_{\text{ох.в}}$ – втрати теплоти з охолоджуючою водою, ГДж;

$W_{\text{ф}}$ – втрати теплоти через теплопровідність футеровки печі, ГДж.

Корисна витрата енергії $W_{\text{к.ен}}$ розраховується за формулою :

$$W_{\text{к.ен}} = W_{\text{м}} + W_{\text{шл}}, \quad (2.19)$$

де $W_{\text{м}}$ – фізична теплота сталі, Дж;

$W_{\text{шл}}$ – фізична теплота шлаку, Дж.

$$W_{\text{м}} = m_{\text{ш}}(C_{\text{м}}(t_{\text{пл}} - t_{\text{н}}) + q_{\text{м}}, \quad (2.20)$$

де $C_{\text{м}}$ – середня теплоємність металу, кДж/(кг· К);

$t_{\text{н}}$ – температура шихти, що завантажується ;

$t_{\text{пл}}$ – температура плавлення, °С;

$q_{\text{м}}$ – прихована теплота плавлення металу, кДж/кг.

$$W_{\text{м}} = 35000 (700 (1500 - 20) + 284,4 = 36,27 \text{ ГДж},$$

$$W_{\text{шл}} = m_{\text{шл}} \cdot \omega_{\text{шл}},$$

$$\omega_{\text{шл}} = C_{\text{шл}}(t_{\text{пл}} - t_{\text{н}}) = 1,225 (1530 - 20) + 209,5 = 2059,25 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}},$$

де $C_{\text{м}}$ – середня теплоємність шлаку, кДж/(кг· К);

$t_{\text{н}}$ – температура шлаку, що завантажується ;

$t_{\text{пл}}$ – температура плавлення, °С.

$$W_{\text{шл}} = 2059,25 \cdot 4538,006 = 9,345 \text{ ГДж},$$

$$W_{\text{м}} = 45,61 \text{ ГДж}.$$

Втрати теплоти з відхідними газами ($W_{\text{відх.г}}$) визначаються за формулою:

$$W_{\text{відх.г}} = V_{\text{г}} \cdot C_{\text{г}} \cdot t_{\text{г}}, \quad (2.21)$$

де $V_{\text{г}}$ – об'єм відхідних газів, м^3 ;

$C_{\text{г}}$ – середня теплоємність газів, $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$;

$t_{\text{г}}$ – температура відхідних газів, $^\circ\text{C}$.

$$W_{\text{відх.г}} = 1347 \cdot 1470 \cdot 1500 = 2,97 \text{ ГДж}.$$

Тепло, що виноситься частками Fe_2O_3 ($W_{\text{Fe}_2\text{O}_3}$) розраховується за формулою [34]:

$$W_{\text{Fe}_2\text{O}_3} = m_{\text{Fe}_2\text{O}_3} \cdot C \cdot t + q, \quad (2.22)$$

$$W_{\text{Fe}_2\text{O}_3} = 4053,13 (1,23 \cdot 1000 + 209,34) = 8,825 \text{ ГДж}.$$

Для загальної оцінки ендотермічних реакцій ($W_{\text{енд}}$). приймаємо питомі енергетичні витрати на ендотермічні процеси рівними $50 \text{ МДж/т} - 150 \text{ МДж/т}$. Загальна формула може мати вигляд:

$$W_{\text{енд}} = (50 \dots 150)m_0, \quad (2.23)$$

де m_0 – ємність печі, кг .

$$W_{\text{енд}} = 120 \cdot 50 = 6 \text{ ГДж}.$$

Втрати теплоти з охолоджуючою водою ($W_{\text{ох.в}}$) розраховуються за формулою:

$$W'_5 = C_p \cdot G \cdot \rho \cdot \Delta t \cdot \tau, \quad (2.24)$$

де C_p – питома ізобарна теплоємність води, Дж/(кг· К);

G – середня питома витрата води, м³/год;

ρ – густина води, 995,19 кг/м³;

t – середня температура води, °С ;

Δt – різниця температури води на вході і на виході, °С;

τ – тривалість періоду плавки, год.

$$W_{\text{ох.в}} = 4200 \cdot 30 \cdot 995,19 \cdot (41 - 28) \cdot \frac{32}{60} = 0,869 \text{ Гдж.}$$

Втрати теплоти через теплопровідність футеровки печі (W_ϕ). Втрати теплоти теплопровідністю через кладку визначаються окремо для стінок печі, зводу та поду [35]:

$$W'_6 = q_{\text{тп}} \cdot F \cdot \tau_{\text{п}} \cdot 10^{-3}, \quad (2.25)$$

де $q_{\text{тп}}$ – густина теплового потоку на зовнішньому контурі, Вт/м²;

F – площа поверхні, м²;

$\tau_{\text{п}}$ – тривалість періоду плавки, год.

$$q_{\text{тп}} = A \cdot t_{\text{н}}^{1,33} \cdot \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left(\frac{T_{\text{н}}}{100} \right)^4, \quad (2.26)$$

де $t_{\text{н}}$ – температура зовнішньої поверхні, °С;

C_0 – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, Вт/(м²·К),.

$$q_{\text{тп}} = (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}) / (\sum \sigma_i / \lambda_i), \quad (2.27)$$

де $t_{\text{в}}$ – температура внутрішньої поверхні для стін і поду, °C;

λ_i – теплопровідність матеріалу, Вт/(м·K).

Результати розрахунки втрат теплоти через теплопровідність зведені в табл. 2.9.

Таблиця 2.9 – Втрати тепла через теплопровідність

Елемент печі	σ_1 , м	λ_1 , Вт/(м·K)	σ_2 , м	λ_2 , Вт/(м·K)	$\sum \sigma_i / \lambda_i$	$t_{\text{в}}$, °C	$q_{\text{тп}}$, кВт/м ²	F , м ²	W'_6 , кВт·год
Звід	0,17	1,58			0,108	375	10,78	16,3	263
Стіна	0,26	2,83	0,18	1,13	0,313	220	4,15	32,6	203
Под	0,46	2,83	0,23	1,13	0,427	3,11	3,11	16,3	76

Тоді, втрати через теплопровідність футеровки печі складають:

$$W_{\phi} = 1,951 \text{ ГДж.}$$

Сумарні результати розрахунку основних статей втрат та надходження теплоти у вигляді теплового балансу для ДСП-50 наведено в табл. 2.10.

Таблиця 2.10 – Тепловий баланс для дугової печі ДСП-50

Надходження тепла	ГДж	%	Витрата тепла	ГДж	%
Електроенергія, $W_{\text{ел}}$	40,538	61,313	Корисна витрата енергії, $W_{\text{кен}}$	45,61	68,871
Теплота, що надходить з чавуном, $W_{\text{чав}}$	11,954	18,080	Втрати теплоти з відхідними газами та частками Fe_2O_3 , $W_{\text{відх.г}} + W_{Fe_2O_3}$	11,795	17,810
Теплота, що вноситься вапном та доломітом, $W_{\text{вапн}} + W_{\text{дол}}$	0,035	0,053	Теплота ендотермічних реакцій, $W_{\text{енд}}$	6	9,06
Теплота екзотермічних реакцій, $W_{\text{екз}}$	9,982	15,097	Втрати теплоти з охолоджуючою водою, $W_{\text{ох.в}}$	0,869	1,312
Теплота шлакоутворення, $W_{\text{шл}}$	1,103	1,668	Втрати теплоти через теплопровідність футеровки печі, W_{ϕ}	1,951	2,946
Теплота від окиснення електродів, $W_{\text{ок.ел}}$	1,307	1,977			
Теплота, що вноситься повітрям і киснем, $W_{\text{пов}}$	1,198	1,812			
Сума	66,117	100	Сума	66,225	100

Аналіз теплового балансу роботи дугової сталеплавильної печі показує, що 18 % загальної витрати теплоти припадає на викиди разом з відхідних газами, що є досить високим показником витрати і свідчить про доцільність пошуку альтернативних шляхів повторного використання теплоти вторинних енергоресурсів.

2.3 Пошук шляхів вирішення поставленої проблеми

На основі вищенаведених рекомендацій та способів утилізації теплоти відхідних газів обрано найкращу альтернативу з екологічної та економічної точок зору за такими критеріями, як:

- необхідність модернізації та переоснащення технологічного обладнання;
- ефективність утилізації високих температур;
- тривалість реалізації проекту, враховуючи тимчасову зупинку цеху.

Метод аналізу ієрархій Т. Сааті (MAI) посідає особливе місце серед напрацьованих підходів визначення оптимального управлінського рішення, так як забезпечує за допомогою простих і обґрунтованих правил рішення багатокритеріальних задач, які містять якісні та кількісні фактори різної розмірності, використовується для вирішення слабо структурованих і неструктурованих проблем.

Цей метод має якісні переваги порівняно з усіма іншими, оскільки він дозволяє повноцінно враховувати всі критерії, висунуті до вибору найкращої альтернативи. За допомогою цього методу ієрархічно уявляють елементи, що визначають суть проблеми. Проблему вирішують за допомогою математичної обробки послідовних суджень оцінювача та попарних порівнянь [36].

Кількісне відображення критеріїв для кожного із запропонованих заходів наведені в табл. 2.11, згідно інформаційних джерел [37].

Таблиця 2.11 – Кількісна характеристика критеріїв

Заходи	Показник		
	Ефективність утилізації високих температур	Необхідність модернізації та переоснащення технологічного обладнання (у грошовому еквіваленті)	Тривалість реалізації проекту, враховуючи тимчасову зупинку цеху
Застосування рекуперативних (утилізаційних) установок для зовнішніх цілей (підігрів води, опалення)	85%	Втручання в технологію не передбачено 700 000 грн	3 місяців
Застосування рекуперативних установок для внутрішніх технологічних процесів	90%	Потребує технологічних змін плавки сталі 900 000 грн	5 місяців
Застосування комбінованих схема	95%	1 000 000 грн	6 місяців

На основі наведених в табл. 2.11 порівняльних характеристик критеріїв в табл. 2.12 заносимо ступінь важливості кожного запропонованого способу.

Таблиця 2.12 – Вихідні дані способів утилізації теплоти відхідних газів

Заходи	Показник		
	Ефективність утилізації високих температур $a_0^2 = 2$	Необхідність модернізації та переоснащення технологічного обладнання $a_0^1 = 3$	Тривалість реалізації проекту, враховуючи тимчасову зупинку цеху $a_0^3 = 1$
Застосування рекуперативних (утилізаційних) установок для зовнішніх цілей (підігрів води, опалення)	1	3	3
Застосування рекуперативних установок для внутрішніх технологічних процесів	2	2	2
Застосування комбінованих схема	3	1	1

Визначаємо вагові коефіцієнти для використаних підходів та ступінь важливості. Для цього скористаємось формулами:

$$B = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n A_i} \quad (2.28)$$

$$M = \frac{B_i}{\sum B_i} \quad (2.29)$$

Підсумкове значення ваги по кожному критерію знаходимо за наступною формулою [36]:

$$N_j = \sum_{i=1}^N M_i \cdot M_0. \quad (2.30)$$

Розраховані значення ваги кожного підходу:

$$N_1 = 0,333; N_2 = 0,162; N_3 = 0,234.$$

Отже, за аналізом методу ієрархій, найкращим способом утилізації теплоти відхідних газів є застосування рекуперативних (утилізаційних) установок для зовнішніх цілей (підігрів води, опалення приміщень).

Висновки до розділу 2

1. Обґрунтовано можливість запровадження додаткових технологічних рішень щодо рекуперації теплоти високотемпературних газів плавильної ділянки ливарного цеху, шляхом оцінювання енергетичного режиму дугової електропечі.

2. Визначено, що згідно теплового балансу з відхідними газами дугової сталеплавильної печі втрачається 18 % загальної витрати теплоти, що свідчить про доцільність пошуку альтернативних шляхів утилізації теплоти відхідних газів плавильної ділянки ливарного цеху.

3. Обрано, за допомогою методу ієрархій, альтернативу з екологічної та економічної точок зору, вторинного використання енергоресурсів – застосування рекуперативних (утилізаційних) установок для зовнішніх цілей (підігрів води, опалення приміщень), так як ваговий коефіцієнт методу перевищує коефіцієнти інших запропонованих заходів і складає – 0,333.

3 ВПРОВАДЖЕННЯ КОМПЛЕКСНОЇ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ РЕКУПЕРАЦІЇ ВІДХІДНИХ ГАЗІВ ЛИВАРНОГО ЦЕХУ

У другому розділі було обґрунтовано доцільність пошуку альтернативних шляхів утилізації високотемпературних газів, на основі аналізу енергетичного режиму дугової печі ДСП-50. За допомогою методу ієрархій визначено спосіб рекуперації відхідних газів.

Метою даного розділу є розробка комплексної схеми рекуперації високотемпературних газів, з подальшим використанням теплоти споживачем – опалення приміщень, гаряче водопостачання. Дослідження впливу початкових параметрів відхідних газів та витрати гарячого теплоносія на коефіцієнт теплопередачі теплообмінного агрегату.

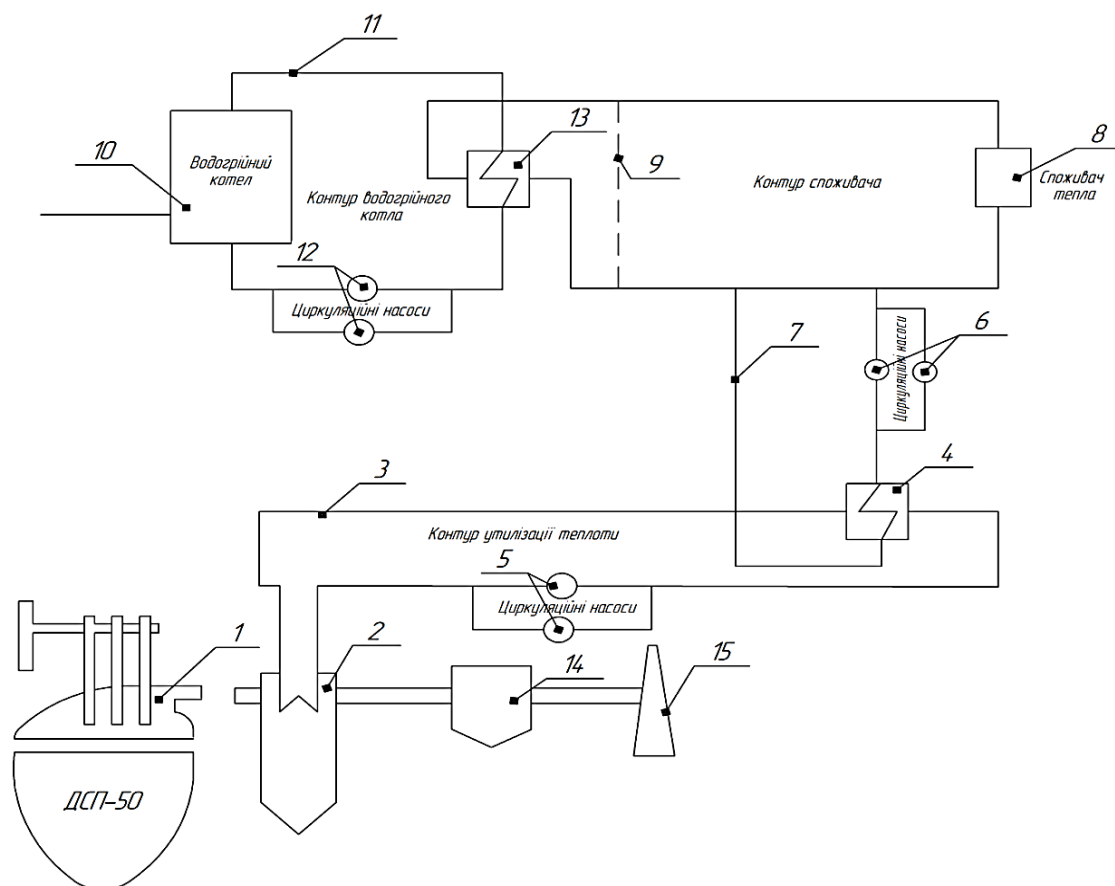
3.1 Характеристика комплексної схеми утилізації високотемпературних газів дугової сталеплавильної печі

Розробка технологічної схеми утилізації теплоти високотемпературних газів пропонується на базі плавильної ділянки, машинобудівного підприємства ПАТ «Сумське НВО», оснащеною дуговою сталеплавильною піччю марки ДСП-50.

Для опалення приміщень ливарного цеху та гарячого водопостачання підприємство обладнано власною котельною, де використовується двоконтурний водогрійний котел марки КСВа-1,0, що працює на природному газі. Паспортна витрата газу для котла складає 117, 7 м³/год.

Пропонується існуючу систему водо- та теплопостачання – водогрійний котел, додатково облаштувати рекуперативними теплообмінними установками за допомогою яких буде здійснюватися підігрів води для побутових потреб та теплопостачання.

Запропонована технологічна схема утилізації відхідних високотемпературних газів від плавильного агрегату наведена на рис. 3.1.



1 – дугова сталеплавильна піч ДСП-50; 2 – теплообмінник; 3 – контур утилізації теплоти; 4 – теплообмінник; 5 – циркуляційні насоси подачі охолодженої води; 6 – циркуляційні насоси подачі гарячого теплоносія; 7 – трубопровід подачі гарячого теплоносія; 8 – споживач тепла; 9 – розмежувальний контур; 10 – водогрійний котел; 11 – контур водогрійного котла; 12 – циркуляційні насоси контуру водогрійного котла; 13 – теплообмінник; 14 – газоочисне обладнання; 15 – димова труба

Рисунок 3.1 – Технологічна схема утилізації відхідних високотемпературних газів від плавильного агрегату ДСП-50

Основними завдання, що були поставлені перед новоствореною системою є ефективна утилізація високотемпературних газів та попередження температурних перепадів теплоносія, який надходить споживачеві, що зумовлюється періодичністю роботи плавильного агрегату.

Схема утилізації високотемпературних газів містить три замкнуті контури:

- утилізаційний контур, що утворюється з елементів охолодження конструкцій плавильної печі, трубопроводу подачі гарячого теплоносія споживачу, рекуперативного теплообмінника та циркуляційного насоса для зворотного забору охолодженої води;

- контур споживача теплоти, що складається з трубопроводу подачі гарячого теплоносія споживачу, циркуляційних насосів та додатково встановленого рекуперативного теплообмінника;

- до складу контуру водогрійного котла входить циркуляційний насос та водогрійний котел.

За рахунок того, що три контури замкнуті вони працюють в автономному режимі, це попереджає зупинку роботи технологічної схеми утилізації теплоти відхідних газів у разі несправності одного з контурів. Контури пов'язані між собою автоматичною системою управління, завдяки чому можливо керувати витратою води на утилізаційних установках. Контур споживача та утилізації теплоти містять датчики температур, задля контролю за температурою теплоносія.

Охолодження відхідних газів здійснюється шляхом встановлення на шляху їх виходу рекуперативного теплообмінника з теплоносієм типу газ-вода, який забирає теплоту газів та передає рідкому теплоносію. Відхідні гази знижують температуру та надходять на очисну установку з подальшим видалення в атмосферу через димову трубу.

За допомогою циркуляційних насосів вода по утилізаційному контуру подається до теплообмінника і нагрівається до певної температури за рахунок отриманої теплоти відхідних газів.

Підігріта вода направляється по контуру подачі гарячого теплоносія і надходить до рекуперативного теплообмінника, віддає тепло, за допомогою якого підігрівається теплоносій контуру споживача, охолоджена вода повертається на циркуляційні насоси, тим самим замикаючи контур.

Теплоносій контуру споживача циркуляційними насосами подається на рекуперативний теплообмінник і нагрівається водою утилізаційного контуру.

Після теплообмінника підігріта вода по розмежувальному контуру постачається споживачам тепла. В якості споживача в опалювальний осінньо-зимовий період виступають мережі тепlopостачання виробничого цеху та водопостачання для господарських потреб, у весняно-літній період лише гаряче водопостачання.

У разі, якщо температура води контуру споживача є недостатньою, що фіксується датчиками температури, можливе додаткове нагрівання води до задовільної температури за допомогою водогрійного котла. Для цього утилізаційною схемою відхідних температурних газів передбачений додатковий контур, який спрацьовує у випадках нестабільної роботи плавильного агрегату: у разі технологічних порушень чи зменшенні продуктивності плавильного агрегату, що спричинить зниження температури відхідних газів і призведе до недостатньої кількості отримуваної теплоти.

До складу додаткового контуру входить існуючий на підприємстві водогрійний котел марки КСВа-1,0, який працює за рахунок спалювання природного газу та циркуляційний насос.

Вода контуру споживача надходить для догрівання до водогрійного контуру за допомогою циркуляційних насосів, догрівається до необхідної температури на водогрійному котлі і повертається в контур споживача.

Впровадження запропонованого технологічного рішення рекуперації теплоти високотемпературних газів плавильної ділянки ливарного цеху для використання теплоти газів в якості вторинних енергоресурсів, дозволить зменшити витрати на теплоносії (природний газ) та знизити безпосередньо температуру викидів для попередження теплового забруднення атмосфери.

3.2 Вибір типу теплотехнічного обладнання для рекуперації теплоти

Основними типами рекуперативних апаратів є: кожухотрубні теплообмінники, теплообмінники типу «труба в трубі», спіральні (змійовикові) теплообмінники, пластинчасті теплообмінники [38].

Тому постає проблема вибору оптимального теплообмінного апарату. Розглянемо порівняльну таблицю конструктивних характеристик для обладнання (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Порівняння конструктивних характеристик рекуперативного обладнання [39]

Тип теплообмінного апарату	Компактність і металоємність		Відносна витрата металу на одиницю теплоти	Теплова ефективність, %
	Площа поверхні теплообміну на одиницю об'єму, $\text{м}^2/\text{м}^3$	Витрата металу на 1 м^2 площі теплообміну, $\text{кг}/\text{м}^2$		
Пластинчасті	10-60	5-20	0,2	85-95
Кожухотрунні	18-40	38-80	1	70-80
Спиральні	34-72	30-50	0,2-0,9	70-80
Теплообмінники типу "труба в трубі"	4-15	175-200	1,5-3	65-70

Для оптимального вибору теплообмінного апарату скористаємося функцією «Пошук рішень» в Microsoft Excel. Для цього задаємо цільову функцію у вигляді металоємності обладнання, так як це основний показник, який впливає на подальшу проектну вартість установок та обмеження щодо продуктивності рекуперативного апарату (рис. 3.2).

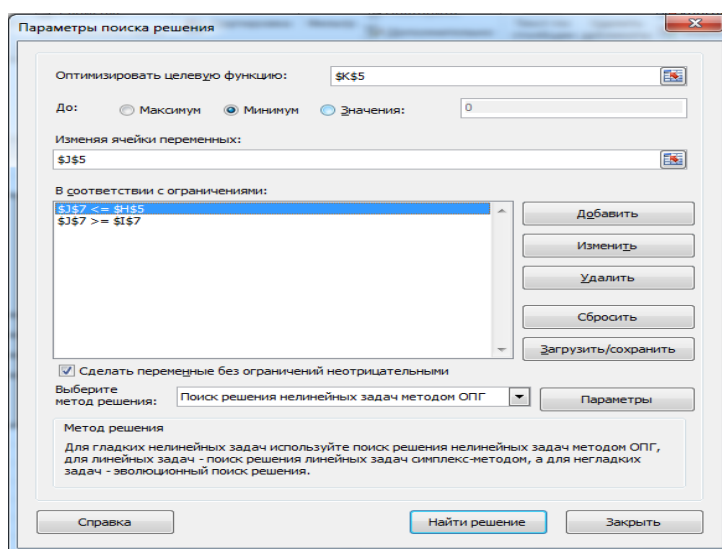


Рисунок 3.2 – Умови пошуку рішень: цільова функція – металоємність обладнання, що відповідає мінімальному значенню, в якості обмеження виступає паспортна витрата обладнання

Отримані результати наведені на рис. 3.3.

Тип теплообмінного апарату	Орієнтовний час роботи, год	Теплова ефективність, %	Компактність і металоємність		Паспортна продуктивність, тис. м ³ /год	Об'ємна витрата, тис. м ³ /год	Металоємність, кг
			Площа поверхні теплообміну на одиницю об'єму, м ² /м ³	Витрата металу на одиницю площі теплообміну, кг/м ²			
Пластинчасті	5000	85-95	60	20	40	25	1500
Кожухотрубні	5000	70-80	40	80		22	3520
Спиральні	5000	70-80	72	50		16	2880
Теплообмінники типу "труба в трубі"	5000	65-70	15	200	18	18	2700

Рисунок 3.3 – Результати пошуку оптимального обладнання

Отже в результаті проведеного пошуку встановлено, що найбільш оптимальним обладнанням за умови цільової функції – мінімальне значення металоємності та значень теплової ефективності згідно табл. 3.1 буде пластинчастий теплообмінний апарат.

Пластинчастий теплообмінник (ПТ) складається з наступних елементів: двох плит, входних і вихідних патрубків з різними видами з'єднань, комплекту жорстко і герметично з'єднаних робочих пластин, спеціальних напрямних, різьбових метизів та підставки для монтажу в системі теплопостачання [40].

Головним елементом теплообмінника є пластини, які призначені для передачі теплової енергії одного теплоносія іншому. Вони виготовляються з інертних матеріалів, стійких до корозії та високих температур. Залежно від потужності вони мають товщину від 0,4 мм до 1 мм.

Вибір матеріалу для виробництва пластинчастих теплообмінників залежить від характеристик, якими вони повинні володіти.

Принцип дії пластинчастого теплообмінника пов'язаний з тим, що під час проходження середовища через теплообмінник відбувається передача тепла пластині. Остання охолоджується зі зворотного боку середовищем, що нагрівається.

Кожна пластина теплообмінника має чотири отвори для теплоносія і ущільнення: два отвори для підведення і відведення гарячого теплоносія та два отвори для точного з'єднання пластин і ізоляції теплоносіїв, за рахунок установки невеликих ущільнювачів. Рух теплоносія в пластинчастому

теплообміннику відбувається з завихренням потоку. Цей фактор сприяє посиленню обміну тепловою енергією на тлі малого опору руху рідини.

Завихрення і петлі потоку рідкого середовища створюють умови для багаторазового обміну тепловою енергією. В результаті досягається максимальний коефіцієнт корисної дії пластинчастого теплообмінника [41].

Таким чином, вибір теплообмінника залежить від умов його експлуатації, чим більша потужність системи в цілому, тим більше пластин необхідно, адже від цього залежить продуктивність і коефіцієнт корисної дії всього комплексу обладнання системи тепlopостачання

3.3 Теплотехнічні розрахунки рекуперативного обладнання

Під час проектування нових схем теплообмінних апаратів (ТА) необхідно провести тепловий розрахунок, кінцевою метою якого, є визначення розмірів поверхні теплообміну, що забезпечує необхідну теплопродуктивність при заданих температурах і витратах робочих середовищ. Для виконання проектних розрахунків, виходячи з досвіду експлуатації існуючих теплообмінних апаратів або на основі дослідно конструкторських випробувань, необхідно вибрати тип апарату, його принципову схему, напрям руху потоків теплоносіїв та матеріали для виготовлення окремих конструктивних елементів.

Основними розрахунковими співвідношеннями при проведенні теплотехнічного розрахунку теплообмінного апарату є рівняння теплопередачі і теплового балансу.

Початковими вихідними даними для розрахунку теплообмінного апарату є витрати теплоносіїв, їх початкові і кінцеві температури. Відсутні величини визначають з теплового балансу. Теплофізичні і інші властивості теплоносіїв, що мають істотне значення для вибору і розрахунку теплообмінного апарату, передбачаються відомими.

Кожен з трьох замкнутих контурів на технологічній схемі утилізації відхідних високотемпературних газів від плавильного агрегату ДСП-50

наведений на рис. 3.1 містить теплообмінний апарат, тому існує необхідність в розрахунку кожного контуру окремо задля визначення теплотехнічних показників утилізаційного обладнання та кінцевої робочої температури, що надходить споживачеві.

3.3.1 Розрахунок утилізаційного контуру

Утилізаційний контур містить теплообмінний пристрій типу повітря-вода. В якості гарячого теплоносія виступають високотемпературні відхідні гази плавильного агрегату, а рідина, що нагрівається за рахунок отриманої теплоти – вода. Схема руху теплоносіїв протитечійна.

Рівняння теплового балансу для теплообмінного апарату в загальному описується виразом [42]:

$$Q = G_1 \cdot c_{p1}(t'_1 - t''_1) = G_2 \cdot c_{p2}(t'_2 - t''_2), \quad (3.1)$$

де G_1, G_2 – масова витрата теплоносія та рідини, що нагрівається, кг/с;

c_{p1}, c_{p2} – питома теплоємність теплоносія та рідини, що нагрівається, Дж/(кг·К);

t'_1, t''_1 та t'_2, t''_2 – температура теплоносія та рідини, що нагрівається на вході в теплообмінник та на виході з нього (кінцеві температури), °С.

Вихідними даними, що були використані для проведення теплотехнічного розрахунку теплообмінного апарату наведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Вихідні параметри для проведення теплотехнічного розрахунку

Вхідний параметр	Одиниці вимірювання	Значення
Температури відхідних газів на вході, t'_1	°С	1000
Температури газів на виході, t''_1	°С	150
Температура води на вході, t'_2	°С	40
Масова витрата гарячого теплоносія, G_1	кг/с	0,6
Масова витрата холодного теплоносія, G_2	кг/с	1,2

Так як температура води на виході з теплообмінника спрогнозувати неможливо, розрахуємо потужність теплообмінника за показниками для повітря. Середня температура гарячого теплоносія складає:

$$\bar{t}_1 = \frac{1000 + 150}{2} = 575 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Згідно таблиць «Термодинамічні властивості повітря» знаходимо теплоємність повітря для середньої температури – $c_{p1} = 1,109 \text{ кДж / (кг} \cdot \text{К)}$ [43].

Тоді шукане значення потужності теплообмінного апарату складає:

$$Q = 0,6 \cdot 1109 \cdot (1000 - 150) = 565590 \text{ Вт.}$$

На основі формули (3.1) та отриманого значення потужності знаходимо температуру холодного теплоносія на виході з теплообмінника [44].

$$t_2'' = t_2' + \frac{Q}{G_2 \cdot c_{p2}}, \quad (3.2)$$

Питома теплоємність c_{p2} залежить від шуканої температури холодного теплоносія, тому розрахунок проводимо методом ітераційних наближень, приймаємо, що $t_2' = t_2'' = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

За даними таблиць «Термодинамічні властивості води та водяного пара» знаходимо теплоємність – $c_{p2} = 4,174 \text{ кДж / (кг} \cdot \text{К)}$ [45].

Температура холодного теплоносія на виході в другому наближенні:

$$t_2'' = 40 + \frac{565590}{1,2 \cdot 4174} = 152,9 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Розходження між прийнятим і отриманим значенням температури t_2'' складає:

$$\Delta = \frac{|40 - 152,9|}{152,9} \cdot 100 \% = 73 \%$$

Похибка ітераційного процесу визначення температури t_2'' більше 5%, тому розрахунок повторюємо для нового значення 152,9 °C.

Середня температура холодного теплоносія складає:

$$\bar{t}_2 = \frac{40 + 152,9}{2} = 96,45 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$t_2'' = 40 + \frac{565590}{1,2 \cdot 4212} = 151,9 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Розходження між прийнятим і отриманим значенням температури t_2'' складає:

$$\Delta = \frac{|152,9 - 151,9|}{151,9} \cdot 100 \% = 0,65 \%$$

Похибка ітераційного процесу визначення температури t_2'' задовільняє умову $\Delta < 5\%$, тому надалі в розрахунках приймаємо температуру холодного теплоносія на виході рівною 152 °C.

Згідно теплового балансу (3.1) коефіцієнт корисної дії (ККД) для контуру складає:

$$\eta = \frac{G_1 \cdot c_{p1}(t_1' - t_1'')}{G_2 \cdot c_{p2}(t_2' - t_2'')} = 89\%.$$

Для простих схем руху теплоносія (прямотечійні чи протитечії) середня логарифмічна температура визначається за формулою [46]:

$$\overline{\Delta t} = \frac{(t_1' - t_2'') - (t_1'' - t_2')}{\ln\left(\frac{t_1' - t_2''}{t_1'' - t_2'}\right)}. \quad (3.3)$$

Тоді, згідно вихідних даних:

$$\overline{\Delta t} = \frac{(1000 - 152) \cdot (150 - 40)}{\ln\left(\frac{1000 - 152}{150 - 40}\right)} = 361,37 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Середня температура води:

$$t_2 = \frac{(152 + 40)}{2} = 95,95 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Середня температура повітря:

$$t_1 = t_2 + \overline{\Delta t} = 95,95 + 361,37 = 457,31 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Для отриманих температур за таблицями [45], [43] запишемо теплофізичні властивості теплоносіїв зведені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Теплофізичні властивості теплоносіїв

Теплофізичні властивості повітря при $t_1 = 457,31 \text{ }^{\circ}\text{C}$		Теплофізичні властивості води при $t_2 = 95,95 \text{ }^{\circ}\text{C}$	
Густина, кг/м^3	0,62	Густина, кг/м^3	961,01
Теплопровідність, $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	0,0512	Теплопровідність, $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	0,67695
Теплоємність, $\text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$	1434	Теплоємність, $\text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$	4211
Динамічна в'язкість, $\text{Па}\cdot\text{с}$	0,0000348	Динамічна в'язкість, $\text{Па}\cdot\text{с}$	0,0002985

Густина для повітря розрахована згідно рівняння Менделєєва-Клапейрона, так як повітря перебуває під тиском 1,3 бар.

Рівняння теплопередачі для теплообмінного пристрою має вигляд :

$$Q = K \cdot F \cdot \overline{\Delta t}, \quad (3.4)$$

де K – коефіцієнт теплопередачі, Вт/м²;

F – поверхня теплообміну, м²;

$\overline{\Delta t}$ – середня логарифмічна температура, °С .

Орієнтовний коефіцієнт теплопередачі від газу до рідини взятий згідно таблиці [47] і складає $K = 55$ Вт/м² .

З виразу (3.4) знаходимо поверхню теплообміну для обладнання, що є основним параметром під час підбору теплотехнічного обладнання:

$$F = Q / K \cdot \overline{\Delta t} = \frac{565590}{55 \cdot 361,37} = 28,45 \text{ м}^2.$$

Згідно [48] розрахованому значенню відповідає теплообмінник типу ТПР поверхнею 31,5 м², поверхня пластин $f = 0,6$ м², кількість пластин $n = 56$. Технічна характеристика пластин наведена в [48].

Розраховуємо кількість послідовно з'єднаних пакетів по величині допустимого опору теплообмінника, використовуючи наступний вираз:

$$z = 0,01 \cdot (p \cdot n^2 \cdot S^2 / V^2)^{\frac{1}{3}}, \quad (3.5)$$

де p – допустимий тиск, Па;

n – кількість пластин в теплообміннику;

S –поперечний переріз каналу, мм;

V – об'ємна витрата відповідного потоку, м³/с.

Знаходять кількість каналів для відповідних потоків:

$$\begin{aligned} m &= m_i / z_i, \\ m_1 &= n / 2 + 1, \\ m_2 &= n / 2, \end{aligned} \quad (3.6)$$

де m_i – загальна кількість каналів для одного із теплоносіїв;

n – кількість пластин в теплообміннику;

z_i – кількість пакетів, прийняте для одного із теплоносіїв;

m – кількість каналів в одному пакеті.

Об’ємна витрата гарячого та холодного теплоносія [49]:

$$V_1 = G_1/\rho = 0,6/0,62 = 0,968 \text{ м}^3/\text{с},$$

$$V_2 = G_2/\rho = 1,2/961,01 = 0,0012 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Кількість послідовно з’єднаних пакетів в пластинчастому теплообміннику:

$$z_1 = 0,01 \cdot ((1,3 \cdot 10^5 \cdot 0,00262^2 \cdot 56^2)/0,968^2)^{\frac{1}{3}} = 1,044,$$

$$z_2 = 0,01 \cdot ((1,3 \cdot 10^5 \cdot 0,00262^2 \cdot 56^2)/0,0012^2)^{\frac{1}{3}} = 12,15.$$

Загальна кількість каналів в кожному пакеті:

$$m_1 = 56/2 + 1 = 29,$$

$$m_2 = 56/2 = 28.$$

Швидкість теплоносія в каналі визначається за формулою [50]:

$$w = \frac{G}{m \cdot \rho \cdot S}, \quad (3.7)$$

Тоді швидкість повітря в 29 каналах складе:

$$w_1 = \frac{0,6}{29 \cdot 0,62 \cdot 0,00262} = 12,74 \text{ м/с}.$$

Для визначення режиму руху теплоносія знаходимо критерій Рейнольдса за формулою:

$$Re = \frac{w \cdot d_e \cdot \rho}{\mu}, \quad (3.8)$$

де w — швидкість теплоносія, м/с;

d_e — еквівалентний діаметр, м;

ρ — густина теплоносія, кг/м³;

μ — динамічна в'язкість, Па·с.

Для гарячого теплоносія критерій Рейнольдса відповідає значенню:

$$Re_1 = \frac{12,74 \cdot 0,0074 \cdot 0,62}{0,0000348} = 1679,2.$$

$Re_1 > 50$, отже режим руху повітря турбулентний.

Критерій Прандтля:

$$Pr = \frac{\mu \cdot c}{\lambda}, \quad (3.9)$$

де μ — динамічна в'язкість, Па·с;

c — теплоємність теплоносія, Дж/(кг·К).

Критерій Прандтля для гарячого теплоносія:

$$Pr = \frac{0,0000348 \cdot 1434}{0,0512} = 0,975.$$

З урахування режиму руху — турбулентний, знаходимо критерій Нуссельта для теплоносія [51]:

$$Nu = 0,135 \cdot Re^{0,73} \cdot Pr^{0,43}, \quad (3.10)$$

$$Nu_1 = 0,135 \cdot 1679,2^{0,73} \cdot 0,975^{0,43} = 15,21.$$

Знаходимо коефіцієнт тепловіддачі теплоносія за формулою:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_e}. \quad (3.11)$$

Тоді для повітря коефіцієнт тепловіддачі складає:

$$\alpha_1 = (15,21 \cdot 0,0512) / 0,0074 = 105,23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

За формулою (3.7) швидкість води в 28 каналах складе:

$$w_2 = \frac{1,2}{28 \cdot 961,01 \cdot 0,00262} = 0,017 \text{ м/с}.$$

Для холодного теплоносія критерій Рейнольдса за формулою (3.8) відповідає значенню:

$$Re_2 = \frac{0,017 \cdot 0,0074 \cdot 961,01}{0,0002985} = 405,5.$$

$Re_1 > 50$, отже режим руху повітря турбулентний.

Критерій Прандтля для холодного теплоносія (3.9):

$$Pr = \frac{0,0002985 \cdot 4211}{0,67695} = 1,86.$$

З урахування режиму руху – турбулентний, знаходимо критерій Нуссельта для холодного теплоносія (3.10):

$$Nu_2 = 0,135 \cdot 405,5^{0,73} \cdot 1,86^{0,43} = 14,12.$$

Тоді для води коефіцієнт тепловіддачі за формулою (3.11) складає:

$$\alpha_2 = (1291,45 \cdot 0,67695)/0,0074 = 1291,45 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Загальний термічний опір розраховуємо за формулою:

$$R_{\text{заг}} = \frac{1}{r_1} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{1}{r_2}, \quad (3.12)$$

де r_1 — теплопровідність забруднень зі сторони повітря, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

r_2 — теплопровідність забруднень зі сторони води середньої якості, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

$\lambda_{\text{ст}}$ — теплопровідність жаростійкої сталі, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

$\delta_{\text{ст}}$ — товщина гофрованих пластин теплообмінного апарату, м.

Показники r_1 , r_2 , $\lambda_{\text{ст}}$ використовуються на основі табличних даних [52].

$$R_{\text{заг}} = \frac{1}{2800} + \frac{0,001}{44,8} + \frac{1}{18600} = 0,0112 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)}/\text{Вт}.$$

Розрахунковий коефіцієнт теплопередачі теплообмінного пристрою типу повітря-вода:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + R_{\text{заг}} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{105,23} + 0,0112 + \frac{1}{1291,45}} = 89,33 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Таким, чином з урахуванням отриманого коефіцієнта теплопередачі розрахункова поверхня теплопередачі рекуперативного апарату складає 27 м^2 , що не перевищує попередньо отримане оціночне значення площі і свідчить про

достовірність обраного типу теплообмінного обладнання – ТПР з поверхнею теплообміну $31,5 \text{ м}^2$, поверхнею пластин $f = 0,6 \text{ м}^2$ та кількістю пластин $n = 56$.

3.3.2 Розрахунок контуру споживача та водогрійного котла

Для контуру споживача та водогрійного котла передбачається встановлення пластинчастого теплообмінного пристрою типу вода-вода.

Для знаходження основних теплотехнічних параметрів обладнання та підбору конструкторських рішень було проведено розрахунки в програмному середовищі «CAS-200». Вихідними даними слугували початкові та кінцеві температури холодного та гарячого теплоносія, витрата води (табл. 3.4).

Таблиця 3.4 – Вхідні параметри для проведення розрахунку

Вхідний параметр	Одиниці вимірювання	Значення
Температура гарячого теплоносія на вході	°C	152
Температури гарячого теплоносія на виході	°C	40
Температура холодного теплоносія на вході	°C	30
Масова витрата гарячого теплоносія	кг/с	1,24
Масова витрата холодного теплоносія	кг/с	1,75

Використовуючи вхідні параметри отримані значення наведені на рис. 3.4.

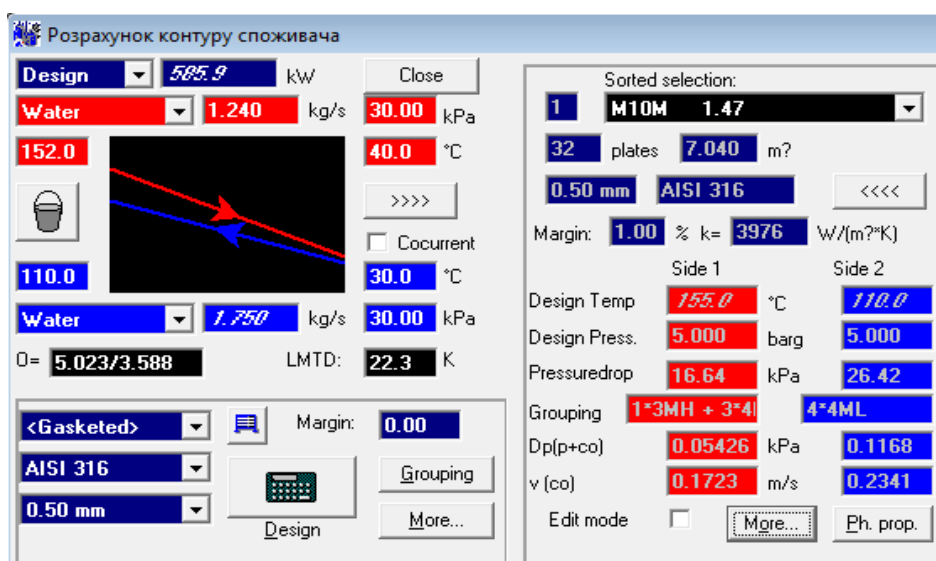


Рисунок 3.4 – Розрахунок параметрів теплообмінного пристрою в програмному середовищі «CAS-200»

Деталізовані теплотехнічні параметри пластинчастого рекуператора наведені на рис. 3.5.

More...				
M10M	Clean k-value:	4014	Service k-value:	3976 W/(m²·K)
Effective area:	6.600		Total Area:	7.040 m²
Fouling:	0.000	m²·K/W	Effective Fouling:	0.02344 m²·K/W
Margin:	0.00 <M= 0.941			
Temperatures				
-----			-----	
Bulk	152.0	39.9 °C		
Wall	133.5	35.2 °C	m(ch)	0.3358 0.4374 kg/s
Wall	127.1	34.2 °C	v(neck)	0.6545 0.8208 m/s
Bulk	110.1	30.0 °C	v(ch)	0.2820 0.3536 m/s
			tau(wall)	12.25 19.43 Pa
M=0%	Rf=0.000	Load=586.7	k=4014	
Dp=16.64	T=152.0>39.9	NTU=5.064		
Dp=26.42	T=110.1<30.0	NTU=3.617		
Conn. Dia.	(m) In/Out	Side 1	0.1000/0.1000	Side 2 0.1000/0.1000
Maldistribution	Side 1 =	-0.5394%	Side 2 =	-0.6847%
Grouping:	Side 1 =	1*3+3*4 MH	Side 2 =	4*4 ML
Thermal effectiveness	Side 1: 92%	Side 2: 66%		
Channel 1				
Re=	11320	5569	3138	
Alpha=	8857	W/(m²·K)		
Wall				
Alpha=	10220	W/(m²·K)		
Channel 2				
Re=	10560	5450	3361	

Рисунок 3.5 – Результати розрахунків теплотехнічних параметрів теплообмінного пристрою в програмному середовищі «CAS-200»

Згідно теплового балансу (3.1) коефіцієнт корисної дії (ККД) для контуру складає:

$$\eta = \frac{G_1 \cdot c_{p1}(t'_1 - t''_1)}{G_2 \cdot c_{p2}(t'_2 - t''_2)} = 85\%.$$

Отже, згідно отриманих даних коефіцієнт теплопередачі для теплообмінного пристрою типу вода-вода контуру споживача складає 3976 Вт/(м²·К), розрахункова поверхня теплообміну – 7,04 м², кількість пластин, що входять до складу пакетів пластинчастого рекуператора – 32. Потужність апарату, яка необхідна для ефективної роботи – 585,9 кВт.

Теплообмінний апарат для водогрійного контуру приймаємо, з такими ж попередньо розрахованими теплотехнічними параметрами та потужністю, так як

робота контуру планується лише при аварійних роботах та технологічних змінах режиму роботи плавильного агрегату і передбачити вихідні температури теплоносіїв на даному етапі неможливо.

3.4 Дослідження впливу початкових параметрів відхідних газів на коефіцієнт теплопередачі теплообмінного агрегату

Головне завдання, що виникає при проектуванні теплообмінних пристроїв, полягає в забезпеченні максимальної інтенсивності процесу теплообміну при оптимальних розмірах і запасах теплообмінної поверхні, здатної гарантувати стабільну працездатність конструкції протягом усього терміну експлуатації.

Основним критерієм оцінки ефективності теплообмінних пристроїв та інтенсивності проходження технологічного процесу є коефіцієнт теплопередачі

Рациональність теплообмінної системи визначається комплексом складових її елементів [53]:

- фізичні параметри теплоносіїв, які позначаються на величині тепловіддачі від носія до акумулюючої стінки і від нагрітої стінки середовищу, що нагрівається;

- конструкторським виконанням теплообмінних поверхонь;
- гідродинамічним режимом руху теплоносіїв, створюваним в апараті.

Було розглянуто пластинчастий рекуператор, де в ролі гарячого теплоносія виступають високотемпературні димові гази. На основі експериментальних даних представлених в роботі [54] досліджено, як впливає на коефіцієнт теплопередачі режим роботи плавильної печі, тобто навантаженість технологічного агрегату. В якості показника, що характеризує навантаженість устаткування виступає швидкість надходження димових газів до пластинчастого рекуператора, виражена в м/с.

Результати експерименту наведені в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Результати проведеного експерименту

Швидкість димових газів (W), м/с	x	2,3	6,8	10,2	14,7	18,6
Коефіцієнт теплопередачі (K), Вт/(м ² · К)	y	45,63	51,26	61,80	68,26	86,23

Для обробки результатів, скористаємося інтерполяційним поліномом Лагранжа 4-го степеня. Після скорочень отримаємо інтерполяційний поліном Лагранжа:

$$L(x) = 0,0053 \cdot x^4 - 0,2147 \cdot x^3 + 2,9887 \cdot x^2 - 13,992 \cdot x + 64,467.$$

Тобто, залежність коефіцієнта теплопередачі пластинчастого рекуператора від навантаження технологічного агрегату матиме вигляд:

$$L(W) = 0,0053 \cdot W^4 - 0,2147 \cdot W^3 + 2,9887 \cdot W^2 - 13,992 \cdot W + 64,467.$$

Графік отриманої залежності наведений на рис. 3.6.

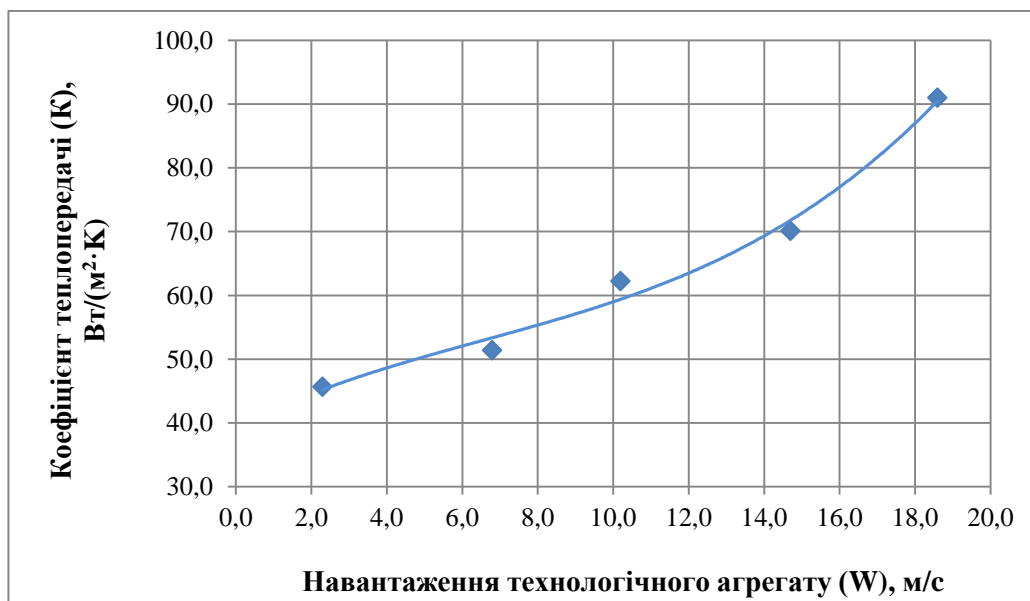


Рисунок 3.6 – Залежність коефіцієнта теплопередачі пластинчастого рекуператора (Вт/(м² · К)) від навантаження технологічного агрегату (м/с)

Аналізуючи графік спостерігаємо, що при збільшенні швидкості відхідних газів плавильного агрегату коефіцієнт теплопередачі пластинчастого рекуператора зростає.

Відповідно до рівняння теплопередачі (3.4) коефіцієнт теплопередачі відноситься обернено пропорційно до площі теплообміну, то зі зростанням швидкостей буде зростати коефіцієнт теплопередачі, і як наслідок зменшуватися розміри площі теплообміну. При цьому буде зменшуватися показник металоємності, який вплине на капітальні витрати поверхні теплообміну – вартість теплообмінника та амортизаційні відрахування.

Витрати на створення та експлуатацію теплообмінного апарату представимо у вигляді [55]:

$$\Pi = (E_n + E_{ам}) \cdot K + E_{ек}, \quad (3.13)$$

де E_n – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень, 1/рік;

$E_{ек}$ – річні експлуатаційні витрати, грн/рік;

$E_{ам}$ – норма відрахувань на амортизацію та поточний ремонт, 1/рік;

K – капітальні вкладення, грн.

Розмір капіталовкладень для пластинчастого рекуператора визначається вартістю 1 м^2 матеріалу з якого виготовляють пластини, тому:

$$K = F \cdot C_f, \quad (3.14)$$

де F – площа теплообміну, м^2 ;

C_f – вартість 1 м^2 матеріалу з якого виготовляють теплообмінник, грн.

Складовою експлуатаційних витрат є вартість спожитої електроенергії:

$$E = C_e \cdot (\Delta N_1 + \Delta N_2) \cdot \tau, \quad (3.15)$$

де $\Delta N_1, \Delta N_2$ – потужності привідних двигунів;

C_e – ціна електроенергії, грн/(кВт·год);

τ – час роботи обладнання.

На основі (3.4), (3.15) та (3.16) формула (3.14) набуває вигляду:

$$\Pi = (E_n + E_{ам}) \cdot F \cdot C_f + C_e \cdot (\Delta N_1 + \Delta N_2) \cdot \tau. \quad (3.16)$$

Використовуючи формулу (3.16) проаналізуємо як зміняться річні витрати на експлуатацію теплообмінника при зміні швидкості надходження відхідних газів до теплообмінних пристроїв (ТП).

В якості вихідних умов використаємо попередньо розраховані дані теплотехнічного розрахунку та значення коефіцієнт теплопередачі згідно табл. 3.6:

- потужність теплообмінного апарату – 565,590 кВт;
- логарифмічне значення середньої температури – 361,37 °С;
- потужність циркуляційних насосів – 35 кВт;
- вартість електроенергії для підприємств станом на 2018 р – 1,4 грн/кВт·год;
- вартість 1 м² матеріалу з якого виготовляють теплообмінне обладнання (жаростійка сталь) – 1000 грн/ м²;
- орієнтовний час роботи обладнання – 7000 год.

Результати розрахунків на основі вхідних даних за формулами 3.4, 3.16 зведені в табл. 3.6.

Таблиця 3.6. Результати розрахунків річних експлуатаційних витрат

Коефіцієнт теплопередачі (K), кВт/(м ² · К)	Площа теплообміну (F), м ²	Річні експлуатаційні витрати (Π), тис.грн	Швидкість димових газів (W), м/с
45,63	34,2407	861,3124	2,30
51,26	30,47997	842,0575	6,80
61,8	25,28161	815,4418	10,20
68,26	22,889	803,1917	14,70
86,23	18,11902	778,7694	18,60

На основі отриманих результатів встановимо залежність річних витрат при експлуатації теплообмінного обладнання від навантаженості технологічного агрегату, тобто швидкості надходження димових газів до пластинчастого рекуператора:

$$\Pi = -0,0043 \cdot W^3 + 0,1486 \cdot W^2 - 6,4498 \cdot W + 876,24.$$

Графік отриманої залежності наведений на рис. 3.7.

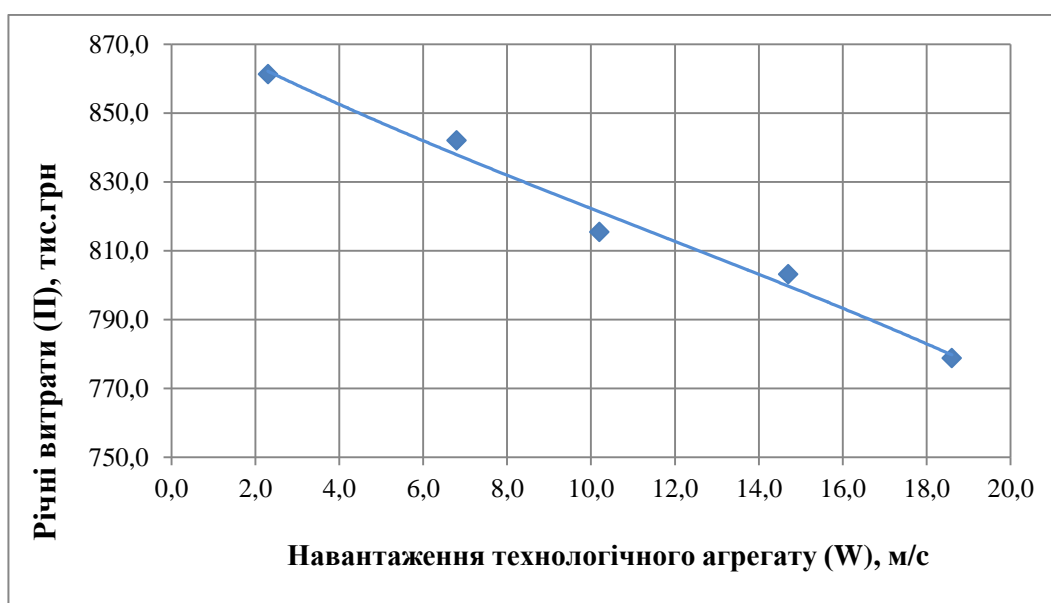


Рисунок 3.7 – Залежність річних витрат при експлуатації теплообмінного обладнання (тис.грн) від навантаження технологічного агрегату (м/с)

Згідно графіку, спостерігаємо, що збільшення швидкості надходження димових газів до пластинчастого рекуператора призводить до зменшення річних витрат на експлуатацію обладнання.

Для теплообмінних присторіїв типу вода-вода, на основі експериментальних даних, наведених в роботі [56], було досліджено залежність коефіцієнта теплопередачі в пластинчастому рекуператорі від витрати гріючого теплоносія – води. Результати експерименту наведені в табл. 3.7.

Таблиця 3.7 – Результати проведеного експерименту

Витрата гарячого теплоносія (V) м ³ /год	x	0,33	0,94	1,2	1,65	1,95
Коефіцієнт теплопередачі (K), КВт/(м ² · К)	y	2	3,1	3,6	3,7	3,9

На основі методу найменших квадратів [56] знайдено залежність між параметрами – коефіцієнта теплопередачі та витратою гарячого теплоносія.

Таким чином залежність коефіцієнта теплопередачі пластинчастого рекуператора від витрати гріючого теплоносія описується виразом:

$$K = 0,2178 \cdot V^3 - 1,484 \cdot V^2 + 3,533 \cdot V + 0,9728.$$

Графік отриманої залежності наведений на рис. 3.8.

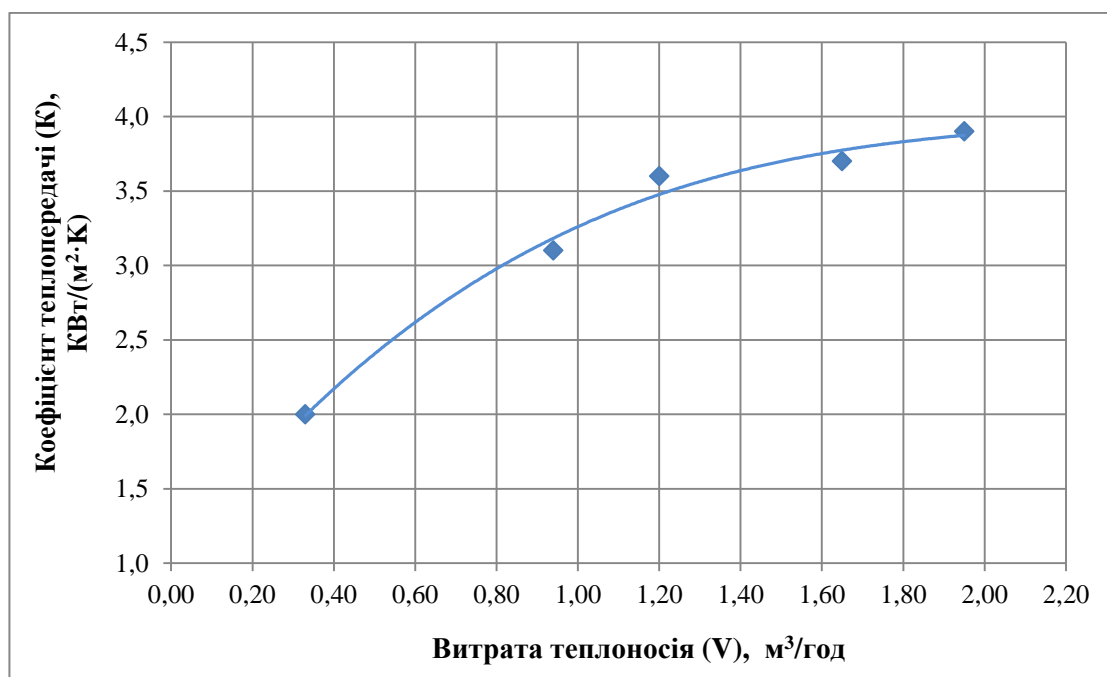


Рисунок 3.8 – Залежність коефіцієнта теплопередачі пластинчастого рекуператора (КВт/(м²·К)) від витрати гарячого теплоносія (м³/год)

Отже. при збільшенні витрати гарячого теплоносія, коефіцієнт теплопередачі рекуперативного обладнання пропорційно зростає, а відповідно показники ефективності роботи теплообмінника також збільшуються

Висновки до розділу 3

1. Розроблено комплексну систему рекуперації високотемпературних газів з подальшим використанням теплоти споживачем – опалення приміщень, гаряче водопостачання.

2. Обрано на основі рішення задачі оптимізації тип теплообмінного обладнання за умови цільової функції представленої мінімальним значенням металоємності та значенням теплової ефективності 85 % – 95 % – пластинчастий теплообмінний апарат.

3. Визначено теплотехнічні показники для теплообмінного апарату типу повітря-вода утилізаційного контуру, згідно яких обрано тип теплообмінного обладнання з поверхнею теплообміну $31,5 \text{ м}^2$, поверхнею пластин $f = 0,6 \text{ м}^2$ та кількістю пластин $n = 56$. Коефіцієнт корисної дії – 89 %.

4. Розраховано за допомогою програмного забезпечення «CAS-200» теплообмінний пристрій типу вода-вода контуру споживача згідно чого, розрахункова поверхня теплообміну – $7,04 \text{ м}^2$, кількість пластин, що входять до складу пакетів пластинчастого рекуператора – 32, потужність апарату, яка необхідна для ефективної роботи – 585,9 кВт. Коефіцієнт корисної дії – 85 %.

5. Отримано значення температури відхідних газів на виході з технологічної схеми рекуперації – $150 \text{ }^\circ\text{C}$, температура води, що надходить до кінцевого споживача – $110 \text{ }^\circ\text{C}$.

6. Встановлено залежність коефіцієнта теплопередачі пластинчастого рекуператора від навантаження технологічного агрегату за допомогою інтерполяційного полінома Лагранжа 4-го степеня, залежність річних витрат при експлуатації теплообмінного обладнання від навантаження технологічного агрегату, залежність коефіцієнта теплопередачі пластинчастого рекуператора від витрати гарячого теплоносія за допомогою методу найменших квадратів.

4 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

Метою даного розділу є проведення маркетингового аналізу для впровадження розробленої технології на ринок: формулювання ідеї проекту, визначення основної групи споживачів, формування можливостей та загроз пропонованої технології.

4.1 Опис ідеї проекту (товару, послуги, технології)

Зміст ідей, що пропонується, напрямки для можливого застосування, вигоди, які може отримати користувач наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Комплексна технологічна система утилізації високотемпературних відхідних газів плавильної ділянки ливарного цеху, яка складається з трьох автономних контурів: утилізаційний контур, контур споживача, контур водогрійного котла	Можливість застосування рекуперованої теплоти на потреби теплопостачання виробничих приміщень	Отримання теплоти за меншу собівартість
		Зменшення викидів в навколишнє середовище через відсутність процесу спалювання природного газу в котельні
	Можливість застосування рекуперованої теплоти для господарських потреб гарячого водопостачання	Відсутність витрат за екологічні податки забруднюючих речовин, що викидаються разом з продуктами горіння
		Попередження теплового забруднення атмосфери за рахунок рекуперації теплоти технологічних газів

Задля наочності отриманої еколого-економічної вигоди від запровадження комплексної системи для підприємств ливарної промисловості наведемо розрахунки можливої економії під час відмови від традиційних джерел отримання теплоти – газової котельні і перехід на використання вторинних енергетичних ресурсів – рекуперації теплоти високотемпературних відхідних газів, на прикладі ливарної ділянки ПАТ «Сумське НВО».

Розрахуємо річну витрату газу (В) під час роботи газової котельні, де використовується двоконтурний водогрійний котел марки КСВа-1,0, за умови, що паспортна витрата природного газу котла складає – 117,7 м³/год, а проектний час роботи – 5000 год:

Вартість 1000 м³ природного газу для підприємств з 1 грудня 2018 р. складає 13734,12 грн [57], тобто підприємство витратить – 808252,962 грн.

Під час роботи котельні згідно [58] в атмосферне повітря надходять продукти горіння разом із забруднюючими речовинами в кількості: оксиди азоту – 0,162 т; оксид вуглецю – 0,203 т; вуглецю діоксид – 113,675 т; азоту оксид – 0,0051 т.

Тоді, сума загальних екологічних податків, згідно податкових ставок [59] складає 1500 грн. Збитки відсутні.

Орієнтовна вартість комплексної проекрованої системи складає 750 тис. грн.

Отже, термін окупності для підприємства обраховується:

$$T_{\text{ок}} = \frac{750000}{808252,962 + 1500} = 0,92 \text{ роки} \approx 11 \text{ місяців.}$$

Отриманий показник терміну окупності складає 11 місяців, що свідчить про рентабельність інвестицій.

Аналіз потенційних конкурентів, виокремлення сильних, нейтральних та слабких сторін запропонованого проекту наведені в табл. 4.2.

Дані щодо потенційних конкурентів заповнені на основі розміщеної на офіційних інтернет-ресурсах інформації [60], [61].

Таблиця 4.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко- економічні характеристик и ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів			W (слабка сторона)	N (нейтраль на сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	VENT- SERVICE	Roen Est			
1	2	3	4	5	6	7	8
1.	Комплексність системи	Система включає повний цикл використання рекуперованої теплоти	Виробляють лише теплообмінні пристрої	Поширюють лише теплообмінні пристрої	Підвищені вимоги до кваліфікації інженерів-проектувальників	-	Система вирішує декілька раціональних проблем одночасно

Продовження табл. 4.2

1	2	3	4	5	6	7	8
2.	Стійкість до високих температур	Діапазон температур досягає 1200 °C	Діапазон температур до 200 °C	Діапазон температур до 200 °C	Потреба в удосконаленні жаростійких матеріалів пластин	-	Можливість використання для висотемпературних апаратів
3.	Індивідуальний технологічний підхід	Можливість змінювати комплексну систему під індивідуальні теплотехнічні параметри	Відсутня можливість проектування обладнання, вибір обмежується наявними розмірами	Відсутня можливість проектування обладнання, вибір обмежується наявними розмірами	Для розроблення проекту необхідний тривалий час	-	Розширення сегменту потенційно можливих споживачів

4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Результати проведеного аудиту технології, за допомогою якої може бути реалізований проект наведені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Зниження температури відхідних газів	Встановлення на шляху викидів забруднюючих речовин теплообмінних пристроїв	Проектування теплообмінних пристроїв із заданими теплотехнічними параметрами	Доступна реалізація розробленого проекту на базі плавильної ділянки
2	Використання рекуперованої теплоти для систем тепло- та водопостачання	В складі комплексної системи включений утилізаційний контур з рідким теплоносієм, який нагрівається зарахунок рекуперованої теплоти	Проектування теплообмінних пристроїв із заданими теплотехнічними параметрами	Доступна реалізація розробленого проекту на базі плавильної ділянки
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: рекуперация теплоти відхідних газів , шляхом встановлення на їх шляху теплообмінних пристроїв; використання рекуперованої теплоти для гарячого тепло та водопостачання				

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Аналіз ринкових можливостей, які сприятимуть ринковому впровадженню запропонованого проекту та ринкові загрози, що здатні перешкоджати впровадженню проекту, характеристика ринкового попиту та динаміка його розвитку наведена в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	2
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	10 млн. грн./рік
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Стагнусь
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Необхідність отримання патенту, відсутність або нестача коштів на реалізацію продукту.
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Отримання сертифікату ISO 1400, відповідність технічним регламентам підприємств
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	25 %

На основі наведених даних в табл. 4.4, визначаємо групу потенційних клієнтів, та особливості їх вимог до продукту (табл. 4.5) .

Таблиця 4.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Потреба в рекуперації технологічних високо температурних газів	Аналогічні підприємства ливарної промисловості	Зацікавлені в низькій ціні	Висока ефективність за найменших капіталовкладень
		Дистриб'юторські компанії, що надають послуги продажу та монтажу обладнання	Зацікавлені в доступності технології та капіталізації прибутку	Конкурентність та відповідність міжнародним стандартам

Результати аналіз ринкового середовища: факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають наведені в табл. 4.6 та табл. 4.7.

Таблиця 4.6 – Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Відсутність капіталовкладень	Відсутність або нестача капіталовкладень	Пошук інвесторів, участь в грантових конкурсах, кредитування
2	Недостатній рівень кваліфікації найманих працівників	Некомпетентність фахівців інженерного проектування	Пошук більш кваліфікованого працівника
3	Неможливість або затягування процесів сертифікації та патентування	Тривалість процедури отримання патенту на пропоновану технологію, або відмова в його отриманні, нестача коштів та отримання сертифікату ISO 14001	Удосконалення системи відповідно до вимог сертифікації та патентування

Таблиця 4.7 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Додаткові капіталовкладення	Отримання додаткових коштів від зацікавлених сторін	Пришвидшення процедур патентування та сертифікації
2	Отримання патенту на товар	Запатентований продукт унеможливає його незаконне використання.	Можливість продажу

Результати аналізу пропозиції, загальних рис конкуренції на ринку наведені в табл. 4.8.

Таблиця 4.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства
1. Вказати тип конкуренції – олігополістичний ринок	Ринок представлений невеликим числом конкурентів	Вихід на ринок може бути ускладнений, через створення олігополістичними групами ціни
2. За рівнем конкурентної боротьби – національний	Пропонований продукт функціонуватиме на території всієї країни	Отримання сертифікату ISO 14001
3. За галузевою ознакою – внутрішньогалузева	Продукт вузькоспеціалізований	Підвищення функціональності та ефективності
4. Конкуренція за видами товарів – товарно-родова	Створюється конкуренція між різними видами товарів, які здатні виконувати однакові функції	Підвищення еколого-економічних показників пропонованого продукту
5. За характером конкурентних переваг – нецінова	Акцентування уваги на якість продукту, ефективність пропонованої технології	Удосконалення технології відповідно до потреб ринку
6. За інтенсивністю – не марочна	Відсутні первинне маркування продукції	З виходом товару на ринок здійснити перехід на марочну конкуренцію.

Результати умов конкуренції в галузі, згідно моделі М. Портера наведені в табл. 4.9.

Таблиця 4.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари заміники
	VENT-SERVICE Roen Est	Потенційні конкуренти відсутні Бар'єри: нестача капіталовкладень, виникнення монополістичної конкуренції	Зростання витрат на розхідні матеріали	Орієнтовані на отримання ефективного продукту за обґрунтовану ціну	Відсутні
	Жоден з конкурентів не виготовляє комплексні системи рекуперації високотемпературних газів	Вихід на ринок може бути ускладнений, через створення олігополістичними групами цін Потенційні конкуренти відсутні Терміни виходу на ринок – до 1 року	Постачальники матеріалів впливають на кінцеву ціну	Удосконалення технології відповідно до потреб ринку	Відсутні

На основі результатів умов конкуренції визначаємо фактори конкурентоспроможності пропонованого продукту (табл. 4.10).

Таблиця 4.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Виробничо-технологічний потенціал	Забезпечує ефективну утилізацію теплоти високотемпературних технологічних газів з подальшим використанням теплоти для побутових потреб підприємства
2	Оптимальна технологія виробництва	Застосовується ефективна система рекуперації на основі пластинчастих рекуператорів
3	Рівень обслуговування	Післяпродажний супровід системи протягом усіх етапів її реалізації, гарантійне обслуговування протягом 3-х років.
4	Задоволення потреб споживача	Можливість спрямування рекуперованої теплоти на потреби тепло та водопостачання

Отже, на основі отриманих даних ринкового аналізу складаємо SWOT-аналіз, де виокремлюємо сильні та слабкі сторони, загрози та можливості впровадження проекту на ринок (табл. 4.11).

Таблиця 4.11 – SWOT-аналіз стартап-проекту

Сильні сторони	Слабкі сторони
<ul style="list-style-type: none"> — покращення екологічної ситуації підприємств; — досягнення економічної вигоди; — низька концентрація виробників теплообмінного обладнання на ринку; — наявність сертифікату якості ISO; — супровід проекту на всіх етапах реалізації 	<ul style="list-style-type: none"> — відсутність попереднього досвіду в розробці аналогічних технологічних систем; — залежність від постачальників розхідних матеріалів
Можливості	Загрози
<ul style="list-style-type: none"> — проникнення на нові сегменти як закордонного так і вітчизняного ринку; — удосконалення запропонованої системи, шляхом розширення можливостей використання теплоти відхідних газів для виробництва електроенергії та потреб суміжних технологічних дільниць; — зменшення собівартості продукції за рахунок використання новітніх технологій та розробок; — нарощення виробничих потужностей; — збільшення рентабельності продукції за рахунок зменшення її собівартості 	<ul style="list-style-type: none"> — виникнення монополістичної конкуренції; — нерегульованість питань ціноутворення, через створення олігополістичних груп ; — відсутність або нестача коштів на реалізацію проекту; — невідповідність умовам сертифікації або/та патентування, технічним регламентам підприємств; — швидка зміна потреб споживача

Згідно даних SWOT-аналіз, розробляємо альтернативу ринкової поведінки та заходи, що сприятимуть виведенню стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації (табл. 4.12).

Таблиця 4.12 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів ринкової поведінки)	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Запуск рекламної компанії: створення власного веб-сайту; запуск селективної реклами; поширення комерційних пропозицій цільовій аудиторії покупців	75 %	3 місяці
2	Участь у міжнародних програмах, грантових конкурсах	50 %	1 рік
3	Продаж технології за умов неспроможності реалізації	50 %	1 місяць

В якості альтернативи ринкової поведінки обираємо – запуск рекламної компанії.

4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Для розроблення ринкової стратегії першочергово визначаємо стратегію охоплення ринку та наводимо характеристику цільових груп потенційних споживачів (табл. 4.13).

Таблиця 4.13 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Аналогічні підприємства ливарної промисловості	Готовність досить висока за умов відповідності усім технологічним стандартам	Попит існує постійно	Інтенсивність середнього рівня	Складність входу – середня
2	Дистриб'юторські компанії, що надають послуги продажу та монтажу	Готовність досить висока за умов можливостей отримання прибутку від реалізації продукту	Попит існує постійно	Інтенсивність високого рівня	Складність входу – висока

На основі результатів аналізу потенційних споживачів в якості цільової групи обираємо безпосередньо вихід на підприємства ливарної промисловості. Характеристика базової стратегії розвитку для обраної групи потенційних споживачів наведена в табл. 4.14.

Таблиця 4.14 – Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	Запуск рекламної компанії	Стратегія концентрованого ринку	Створення спеціалізованого маркетингового комплексу, що спрямований на задоволення потреб обраного сегменту: застосування усіх конкурентоспроможних позицій	Стратегія спеціалізації

Принципи стратегії конкурентної поведінки наведені в табл. 4.15.

Таблиця 4.15 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1	На ринку вже існують технології із застосування рекуперації теплоти, однак пропонується комплексна система для ливарних виробництв буде новою	Пошук нових споживачів та «відбивання» споживачів у конкурентів здійснюватиметься через обмежене коло цільового сегменту	Частково, здійснюється дублювання функцій, що є обов'язковими до виконання	Стратегія конкурентної ніші

Відповідно до вимог споживача обраної цільової групи, та на основі базової стратегії конкурентної поведінки, розробляємо стратегію позиціонування, яка необхідна для формування ринкових пропозицій, за якими споживач має визначити пропонування проект (табл. 4.16).

Таблиця 4.16 – Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Висока ефективність, обґрунтована ціна, конструкторські рішення, що забезпечать еколого-економічну вигоду, без втручання в технологію основного виробництва	Стратегія спеціалізації	Виробничо-технологічний потенціал Оптимальна технологія виробництва Рівень обслуговування Задоволення потреб споживача	Створення товарного знаку Просування сайту Селективна реклама

4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Підсумовуючи, фактори конкурентоспроможності пропонованої технології на основі потреб, що пропонує ринок, визначаємо ключові переваги продукту, в порівнянні з конкурентами (табл. 4.17).

Таблиця 4.17 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Потреба в рекуперації технологічних високотемпературних газів	Використання рекуперованої теплоти на потреби гарячого тепло- та водопостачання	Можливість утилізації високотемпературних димових газів

Аналіз цін конкурентів, характеристика верхньої та нижньої цінової межі, на які необхідно керуватися при визначенні ціни на пропонований продукт наведений в табл. 4.18. В табл. 4.19 визначено оптимальну систему збуту.

Таблиця 4.18 – Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	Відсутні	Найближчим аналогом є компанія Roen East Вартість промислових теплообмінних пристроїв від 250 тис. грн. за одиницю	Рівень доходів підприємств ливарної промисловості сягає 10 млн. грн	400-1500 тис. грн

Таблиця 4.19 – Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Для державних підприємств закупівлі здійснюються через офіційний портал оприлюднення інформації про публічні закупівлі України Prozorro Для приватних підприємств закупівля здійснюється на договірних засадах	Транспортування Встановлення контакту Інформування	Канал нульового рівня, або канал прямого маркетингу, що складається з виробника, який продає свій товар безпосередньо споживачам	Традиційна

Таким, чином підсумком маркетингової програми є розробка концепції маркетингових комунікацій та специфіки поведінки потенційних клієнтів, згідно попередньо встановлених основ для позиціонування (табл. 4.20).

Таблиця 4.20 – Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Орієнтовані на високу ефективність за найменших капіталовкладень	Горизонтальні, оскільки комунікації відбуваються між різними підрозділами	Запуск рекламної компанії: створення власного веб-сайту, поширення комерційних пропозицій потенційним покупцям	Повідомлення про новий товар, формування знань про марку і її виробника	Створення тиску на еколого-економічні характеристики пропонованої технології, можливість отримання теплоти за меншу собівартість

Висновки до розділу 4

1. Сформульовано основну ідею проекту – комплексна технологічна система утилізації високотемпературних відхідних газів плавильної ділянки ливарного цеху з можливістю застосування рекуперованої теплоти на потреби теплопостачання та господарських потреб гарячого водопостачання.

2. Визначено основну групи споживачів – безпосередньо підприємства ливарної промисловості, в якості факторів конкурентоспроможності обрано: виробничо-технологічний потенціал, оптимальна технологія виробництва, рівень обслуговування, задоволення потреб споживача.

3. На прикладі ливарного цеху ПАТ «Сумське НВО» розраховано термін окупності для комплексної системи рекуперації відхідних газів. Отриманий показник складає 11 місяців, що свідчить про рентабельність інвестицій.

4. Встановлено основні можливості та загрози для пропонованої технології на ринку споживачів за допомогою формування SWOT-аналіз, за альтернативу ринкового впровадження стартап-проекту прийнято запуск рекламної компанії.

ВИСНОВКИ

1. Розглянуто основні підходи до вирішення проблеми охолодження технологічних газів, визначено, що найбільш раціональним способом охолодження технологічних газів, перед викидом їх в атмосферу є вторинне використання енергоресурсів – рекуперація відхідних газів з подальшим використанням тепла.

2. Проаналізовано вітчизняний та закордонний досвід утилізації високотемпературних технологічних газів та описів до патентів на корисну модель, згідно до чого існує необхідність удосконалення систем рекуперації, так як пропоновані технології не забезпечують ефективної утилізації високотемпературних газів та не здатні попередити температурні перепади теплоносія.

3. Визначено, що згідно теплового балансу з відхідними газами дугової сталеплавильної печі втрачається 18 % загальної витрати теплоти, що свідчить про доцільність пошуку альтернативних шляхів утилізації теплоти відхідних газів плавильної ділянки ливарного цеху.

4. Обрано, за допомогою методу ієрархій, альтернативу з екологічної та економічної точок зору, вторинного використання енергоресурсів – застосування рекуперативних (утилізаційних) установок для зовнішніх цілей (підігрів води, опалення приміщень), так як ваговий коефіцієнт методу перевищує коефіцієнти інших запропонованих заходів і складає – 0,333.

5. Розроблено комплексну систему рекуперації високотемпературних газів з подальшим використанням теплоти споживачем – опалення приміщень, гаряче водопостачання.

6. Обрано на основі рішення задачі оптимізації тип теплообмінного обладнання за умови цільової функції представленої мінімальним значенням металоємності та значенням теплової ефективності 85 % – 95 % – пластинчастий теплообмінний апарат.

7. Визначено теплотехнічні показники для теплообмінного апарату типу повітря-вода утилізаційного контуру, згідно яких обрано тип теплообмінного обладнання з поверхнею теплообміну $31,5 \text{ м}^2$, поверхнею пластин $f = 0,6 \text{ м}^2$ та кількістю пластин $n = 56$. Коефіцієнт корисної дії – 89 %.

8. Розраховано за допомогою програмного забезпечення «CAS-200» теплообмінний пристрій типу вода-вода контуру споживача згідно чого, розрахункова поверхня теплообміну – $7,04 \text{ м}^2$, кількість пластин, що входять до складу пакетів пластинчастого рекуператора – 32, потужність апарату, яка необхідна для ефективної роботи – 585,9 кВт. Коефіцієнт корисної дії – 85 %.

9. Отримано значення температури відхідних газів на виході з технологічної схеми рекуперації – $150 \text{ }^\circ\text{C}$, температура води, що надходить до кінцевого споживача – $110 \text{ }^\circ\text{C}$.

10. Встановлено залежність коефіцієнта теплопередачі пластинчастого рекуператора від навантаження технологічного агрегату за допомогою інтерполяційного полінома Лагранжа 4-го степеня, залежність річних витрат при експлуатації теплообмінного обладнання від навантаження технологічного агрегату, залежність коефіцієнта теплопередачі пластинчастого рекуператора від витрати гарячого теплоносія за допомогою методу найменших квадратів.

11. Сформульовано ідею стартап-проекту, визначено основну групи споживачів продукту – безпосередньо підприємства ливарної промисловості, в якості факторів конкурентоспроможності обрано: виробничо-технологічний потенціал, оптимальна технологія виробництва, рівень обслуговування, задоволення потреб споживача.

12. На прикладі ливарного цеху ПАТ «Сумське НВО» розраховано термін окупності для комплексної системи рекуперації відхідних газів. Отриманий показник складає 11 місяців, що свідчить про рентабельність інвестицій.

12. Встановлено основні можливості та загрози для пропонованої технології на ринку споживачів за допомогою формування SWOT-аналіз, за альтернативу ринкового впровадження стартап-проекту прийнято запуск рекламної компанії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сабірзянов Т. І. Печі ливарних цехів: навч. посіб. Кіровоград: КНТУ, 2007. 280 с.
2. Чейлитко А. М. Використання вторинних енергоресурсів: навч. посіб. Запоріжжя: ЗДІА, 2014. 246 с.
3. Ровин С. Л. Ресурсосберегающие принципы в литейном производстве. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallurgy*. 2012. № 39. С. 139-141
4. Красненко Т. І, Романтовський В. Д. Використання теплових вторинних енергоресурсів у теплопостачанні: навч. посіб. Харків: КНТУ, 2016. 280 с.
5. Моргунов В. Н. Печи литейных цехов: учебн. пособ. для студ. специальности «Машины и технология литейного производства» специализации «Машиностроительные технологии и оборудование». Пенза, 2009. 179 с.
6. Глиняная Н. Н. Охрана окружающей среды от выбросов литейного производства: учебн. пособ. для студ. специальности «Литейное производство». Краматорск: ДГМА, 2012. 60 с.
7. Герасимов Г. В. Енергоощадність в теплоенергетиці: навч. посіб. для студ. спеціальності «Теплоенергетика». Рівне, 2015. 382 с.
8. Любанов И. Е. Теория интенсифицированного теплообмена и эффективности его применения для перспективных компактных теплообменных аппаратов, применяемых в современном металлургическом производстве. *Грамота*. 2010. №3 (34). С. 24-42.
9. Рей Д. Экономия энергии в промышленности: монография. Москва: Энергоатомиздат, 1983. 208 с.
10. Колодяжный С.А., Кавыгин А. А. Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение. *Вестник ВолгГАСУ*. 2014. № 36 (55). С. 182-188.

11. Теплообмінник для утилізації гарячих відхідних газів: пат. 49015 Україна. № 98115951; заявл. 10.11.1998 ; опубл. 16.09.2002, Бюл. № 9. 2 с.
12. Пристрій для утилізації тепла відхідних газів: пат. 4996 Україна. № 94046891 ; заявл. 30.04.1993 ; опубл. 28.12.1994, Бюл. № 4. 2 с.
13. Пристрій для охолодження газівідводу конвертора: пат. 1027 Україна. № 2001010056 ; заявл. 03.01.2001 ; опубл. 15.08.2001, Бюл. № 7. 3 с.
14. Способ и устройство для использования транспортируемого прерывистым потоком отходящих газов тепла: пат. 2470243 Россия. № 2009148635/02 ; заявл. 28.05.2008 ; опубл. 20.12.2012, Бюл. № 35. 16 с.
15. Интегрированная система охлаждения газа для электрической дуговой печи: пат. 2552803 Россия. № 2013121595/02 ; заявл. 08.05.2013 ; опубл. 20.11.2014, Бюл. № 32. 14 с.
16. Установка для утилізації тепла газів, що відходять з печі: пат. 21971 Україна. № u 200611550 ; заявл. 02.11.2006 ; опубл. 10.04.2007, Бюл. № 4. 2 с.
17. Спосіб використання тепла відхідних газів нагрівальних, плавильних, випалювальних та інших установок: пат. 90716 Україна. № u 201314768 ; заявл. 16.12.2013 ; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 11. 4 с.
18. Заєць О.М. Підвищення ефективності систем високотемпературного нагріву дуттєвого повітря на основі утилізації теплоти продуктів горіння: дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.14.06. Харків, 2017. 223 с.
19. Журавлев А. И. Расчеты материальных и энергетических балансов при выплавке стали в дуговых сталеплавильных печах: учебн. пособ. для студ. специальности «Металлургия» специализации «Металлургия черных металлов». Екатеринбург: УрФУ, 2016. 132 с.
20. Долотов Г. М. Конструкция и расчет заводских печей и сушил: учебн. пособ. для студ. специальности «Литейное производство черных металлов». Москва: Машиностроение, 1973. 272 с.
21. Шаповалов А.Н. Теория и технология производства стали: учебн. пособ. Новотроицк: МИСис, 2015. 176 с.

22. Ведыбеда Д. В. Методика расчета электродуговой плавки с отработкой стали на печь-ковш на примере ДСП-100. *Литье и металлургия*. 2013. №1(89). С. 32-37.
23. Кривандин В. А. Филимонов Ю.П. Теория, конструкции и расчеты металлургических печей: учебн. пособ. Москва: Металлургия, 1986. 479 с.
24. Ойкс Г. Н. Производство стали. Расчеты: монография. Москва: Металлургия, 1975. 480 с.
25. Лисенко В. Г. Сооружение промышленных печей. Проектирование сталеплавильных комплексов: монография. Москва: Теплотехник, 2006. 755 с.
26. Свенчанский А. Д. Электрические промышленные печи. Дуговые печи и установки специального нагрева: учебн. пособ. Москва: Энергоиздат, 1981. 296 с.
27. Лисенко В. Г. Сооружение промышленных печей. Проектирование сталеплавильных комплексов: монография. Москва: Теплотехник, 2006. 755 с.
28. Егоров А. В. Расчет мощности и параметров электроплавильных печей: учебн. пособ. для студ. специальности «Автоматизация технологических процессов и производств». Москва: МИСИС, 2000. 272 с.
29. Лисенко В. И, Щелоков Я.М. Хрестоматия энергосбережения: справочник в 2-х книгах. Москва: Теплотехник, 2005. Кн. 1. 688 с.
30. Лисенко В. И, Щелоков Я. М. Хрестоматия энергосбережения: справочник в 2-х книгах. Москва: Теплотехник, 2005. Кн. 2. 768 с.
31. Тимошпольский В. И, Трусова И. А, Пути повышения энергоэффективности промышленных печей при рекуперации теплоты уходящих дымовых газов. *Литье и металлургия*. 2012. №2 (65). С. 99-101.
32. Карзунова Г. В. Тепловой расчет дуговой сталеплавильной печи: учебн. пособ. Челябинск, 2015. 38 с.
33. Карасев В. П., Сутягин К. Л. Определение мощности тепловых потерь в дуговых сталеплавильных печах. *Электрометаллургия*. 2006. № 3. С. 19-23.

34. Горева Л. П., Бикеев Р. А. Энергетический баланс дуговой сталеплавильной печи. *Электротермические процессы и установки*. 2014. № 4. С.16-24..
35. Зобнин Б. Ф., Казяев М. Д., Китаев Б. И. Теплотехнические расчеты металлургических печей: монография. Москва: Металлургия, 1982. 360 с.
36. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий: монография. Москва: Радио и связь, 1993. 315 с.
37. Курбатов Ю. Л., Масс Н.С. Вторичные энергоресурсы, энерготехнологическое комбинирование и ресурсосбережение: учебн. пособ. Донецк, 2011. 162 с.
38. Таранова Л.В. Теплообменные аппараты и методы их расчета: учебн. пособ. Тюмень: ТюмГНГУ, 2012. 198 с.
39. Ганжа. А. И., Заец Е. Н. Анализ эффективности теплообменников-утилизаторов теплоты энерготехнологических комплексов и агрегатов. *Вісник НТУ «ХПИ»*. 2016. №10 (1182). С. 56-60.
40. Банных О. П. Основные конструкции и тепловой расчет теплообменников: учебн. пособ. Санкт-Петербург: СПбНИУ ИТМО, 2012. 42 с.
41. Денисова А. Е. Рекуперативные теплообменники на основе струйно-вихревой технологии в технологических процессах и аппаратах: дис. на соискание учёной степени д-ра техн. наук: 05.14.06. Одесса, 2015. 190 с.
42. Барулин Е. П., Исаев В. Н. Расчеты теплоиспользующего оборудования: учебн. пособ. Иваново, 2009. 101 с.
43. Сычев В. В. Термодинамические свойства воздуха: монография. Москва, 1978. 276 с.
44. Мозжухи А. Б., Сергеевна А. И. Расчет теплообменника: учебн. пособ. Тамбов, 2007. 32 с.
45. Ривкин С. Л., Александров А.А. Термодинамические свойства воды и водяного пара: справочник. Москва: Энергоатомиздат, 1984. 80 с.

46. Хаузен Х. Теплопередача при противотоке, прямотоке и перекрестном токе: монография. Москва: Энергоатомиздат, 1981. 384 с.
47. Романков П. Г., Фролов В. Ф. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии: учебн. пособ. Санкт-Петербург: Химиздат, 2009. 544 с.
48. Байгалиев Б. Е., Щелчков А. В. Теплообменные аппараты: учебн. пособ. Казань, 2012. 180 с.
49. Бухмиров В. В., Ракутина Д. В. Тепловой расчет рекуперативного теплообменного аппарата: учебн. пособ. Иваново, 2013. 124 с.
50. Арсеньева О. П., Демирский А. В. Один подход к расчету оптимального пластинчатого теплообменника. *Проблемы машиностроения*. 2011. №14. С. 23-30.
51. Ведерников М. И., Таланкин В. С. Расчет пластинчатых теплообменников: учебн. пособ. Екатеринбург, 2008. 29 с.
52. Копко В. М., Пшоник М. Г. Пластинчатые теплообменники в системах центрального теплоснабжения: учебн. пособ. Минск, 2005. 207 с.
53. Кравченко Е. В., Климов С. В. Теплопередача: учебн. пособ. Минск, 2008. 65 с.
54. Кудинов А. А. Энергосбережение в теплогенерирующих установках: монография. Ульяновск: УлГТУ, 2000. 139 с.
55. Редько А. А., Куликова Н. В. Моделирование и оптимизация параметров теплообменников методами неравновесной термодинамики. *Холодильная техника и технология*. 2016. № 19. С. 37-49.
56. Левцев А. П., Кудашев С. Ф. Влияние импульсного режима течения теплоносителя на коэффициент теплопередачи в пластинчатом теплообменнике системы горячего водоснабжения. *Современные проблемы науки и образования*. 2014. №4. С. 89-97.
57. Екологічний податок. URL: <http://sfs.gov.ua/nk/rozdil-viii-ekologichniy-poda> (дата звернення 10.12.2018).
58. Ціни на природний газ. URL: <http://naftogaztrading.com.ua/cina-gazu> (дата звернення 10.12.2018).

59. Збірник показників емісії (питомих викидів) забруднюючих речовин в атмосферне повітря різними виробництвами. Донецьк, 2004. Т 2. 220 с.
60. «Вент-Сервіс» – завод-виробник енергоефективного обладнання для вентиляції та кондиціонування. URL: <http://ventservice.com.ua> (дата звернення 10.12.2018).
61. Офіційний сайт «Roen Est». URL: <http://www.roenest.com/en> (дата звернення 10.12.2018).